П. О. ГРИБОВСКИЙ

ГОРЯЧЕЕ ЛИТЬЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

П. О. ГРИБОВСКИЙ

ГОРЯЧЕЕ ЛИТЬЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1956 ЛЕНИНГРАД

В книге излагаются теоретические основы, технологический процесс, зависимость свойств керамического полуфабриката и изделий от ряда факторов и осиовы конструирования оснастки при применении нового способа производства керамических изделий — горячего литья под давлением. В книге приводится также краткое описание применяемого оборудования и различных методов изготовления изделий горячим литьем.

Книга предназначается для инженеров, техников и мастеров, работающих на керамических производствах, а также для конструкторов.

Автор — *Грибовский Петр Оскарович*

ГОРЯЧЕЕ ЛИТЬЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Редактор *А. Л. Сапарова* Технич. редактор *К. П. Воронин*

Сдано в набор 25/II 1956 г. Т-04167. Подписано к печати 14/V 1956 г.
Бумага 84×108 1/32 9 п. л. + 1 вкл. Уч.-изд. л. 10,5.
Тираж 4 000 экз. Цена 6 р. 25 к. Заказ № 1148

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современные керамические материалы обладают столь высокими свойствами, что могут конкурировать в ряде случаев с металлами и твердыми сплавами. Примером этого может служить опыт применения керамических пластин для металлорежущих инструментов. В качестве электроизоляции, в особенности высокочастотной, керамика по своим свойствам вообще не имеет соперников. Неиссякаемые и многочисленные источники дешевого минерального сырья, необходимого для производства керамики, и упомянутые высокие свойства современных керамических материалов создают самые благоприятные предпосылки для широкого развития производства самых разнообразных и дешевых изделий из керамики. Однако до сих пор производство керамических изделий недостаточно развито, стоимость изделий высока, а качество оставляет желать много лучшего. Такое положение является результатом того, что применяемая на большинстве керамических производств ортодоксальная керамическая технология весьма несовершенна, требует большого объема ручного труда и не обеспечивает высокого качества продукции. За последние годы (1946—1954 гг.) автором при участии большого коллектива инженеров, техников и рабочих ряда заводов и институтов была разработана и внедрена в промышленность новая керамическая технология (горячее литье под давлением), создавшая условия для изменения этого положения.

В предлагаемой вниманию читателя книге делается первая попытка краткого обзора и обобщения результатов научно-исследовательских работ и опыта внедрения технологии горячего литья керамики за истекший период. Все

приведенные в книге экспериментальные данные являются результатом экспериментально-исследовательских работ, проводившихся автором при участии инженеров В. И. Гольдштейн, Е. Г. Смажевской, механиков А. Д. Боголепова, Б. Н. Можаева и др.

Большое участие в доработке технологии и внедрении ее в производство принимали работники ряда предприятий: инженеры М. Е. Аршанский, В. Н. Воинова, И. Н. Гуданис, Л. И. Кантарович, Н. И. Ноткина, Е. А. Тахер, Т. И. Терентьева, Л. А. Токарева, Д. С. Чесалов, механики П. Д. Некрасов, А. К. Миронов и др., которым автор приносит свою глубокую благодарность. Вместе с тем автор выражает свою признательность и благодарность И. И. Китайгородскому и Г. Т. Шитикову за поддержку и содействие в разработке новой технологии.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в различных областях науки и техники возникли проблемы, решение которых оказалось невозможным без использования керамических изделий, обладающих строго определенными и повышенными свойствами и высокой точностью размеров.

Керамическое производство, являясь одним из наиболее древних, развивалось, однако, длительный период времени только по линии производства хозяйственной посуды, строительной и огнеупорной керамики. Лишь за последнее столетие керамические изделия начали все более широко применяться в различных областях науки и техники, главным образом в качестве электрической изоляции. До последних лет удовлетворение запросов техники в основном обеспечивалось изготовлением изоляторов из электротехнического фарфора, производство которых было освоено на специальных керамических заводах.

Бурное развитие отечественной науки и техники выдвинуло новые требования к электроизоляционной керамике по линии повышения электрофизических свойств, точности размеров и сложности конфигурации изделий.

По принятой в производстве керамической технологии, основанной на использовании пластических свойств масс, обеспечить выполнение этих повышенных технических требований оказалось весьма затруднительным, а в ряде случаев — невозможным.

В связи с этим в керамической технике получили довольно широкий размах исследовательские работы, направленные на создание новых керамических материалов, обладающих повышенными и специальными свойствами (высокой диэлектрической проницаемостью, низкими диэлектрическими потерями и т. д.).

В результате научных трудов советских ученых Б. М. Вула, Н. П. Богородицкого, П. П. Будникова, И. И. Китайгородского, Г. И. Сканави и др. керамическая наука обогатилась целым рядом новых открытий и разра-

боток в области новых электроизоляционных керамических материалов.

В то же время в технологии изготовления изделий из новых керамических материалов были сохранены как основные технологические процессы, базирующиеся на пластических свойствах керамических масс. Для осуществления этих технологических процессов новые керамические материалы должны были обязательно обладать пластическими свойствами, в связи с чем в состав этих материалов неизбежно вводились глинистые материалы как носители свойств пластичности.

Керамические материалы, содержащие глины, оказались не в состоянии обеспечить повышенных требований к огнеупорности, электрофизическим свойствам, механической прочности и т. д., что привело к явно выразившейся тенденции уменьшить количество глины, входящей в состав массы, и даже изъять ее полностью.

Однако изъятие глины из состава массы приводит к резкому качественному изменению технологических свойств керамических масс — снижению и даже отсутствию необходимых пластических свойств при смешивании с водой.

Многочисленные попытки создания пластичных масс за счет введения различных пластифицирующих связок носят, как правило, характер частных решений, разработанных авторами данного керамического материала с целью возможности хотя бы частичного практического применения нового материала.

Серьезных обобщающих исследований и успехов в этом направлении как в СССР, так и за рубежом до последнего времени не было известно. Разработка новых керамических материалов оказалась затрудненной требованиями к наличию пластических свойств масс. Технология керамических изделий развивалась крайне медленно, так как обязательное наличие пластических свойств керамических масс ограничивало количество возможных технологических методов изготовления изделий и направляло техническую мысль в рамки установившихся процессов.

За последние годы в СССР для изготовления изделий из новых керамических материалов в области технологии керамических изделий появилось новое направление, отличительной особенностью которого является комплексное использование современных представлений в области

физико-химии поверхностных явлений, технологии керамики и технологии металлов.

Это новое направление получило название технологии горячего литья керамических изделий.

Начало развитию технологии горячего литья керамических изделий положила разработка метода «намораживания», осуществленная автором в 1946 г. [Л. 1].

Предшествовавшие этому периоду отдельные попытки и пробы в этом направлении к практическому успеху не привели.

Применение метода «намораживания» в течение 1946—1948 гг. вызвало постановку ряда исследований, на основе и в результате которых в 1948 г. был разработан способ горячего литья под давлением [Л. 2].

Способ литья под давлением сыграл решающую роль в развитии технологии горячего литья вследствие ряда преимуществ, которыми этот способ обладает.

К положительным особенностям этого способа относятся:

а) высокая производительность труда;

б) высокая точность геометрической формы и размеров изделий;

в) сведение к минимуму необходимости доработки после оформления изделий;

г) универсальность метода, дающая возможность оформления изделий разной формы и габаритов;

д) возможность механизации и автоматизации процесса;

е) простота технологических приемов, не требующих высокой квалификации рабочего оператора.

После разработки и внедрения в производство способа горячего литья под давлением новая технология стала быстро завоевывать себе прочное место в промышленности и развиваться как самостоятельный новый раздел керамической технологии.

Технологию горячего литья, в ряде случаев не без оснований, называют «технологией непластичных материалов», имея в виду, что технология горячего литья обеспечивает возможность изготовлять изделия из так называемых непластичных керамических материалов (т. е. минеральных порошков, не образующих пластичных систем подобно глинам при смешивании их с водой).

Это обстоятельство создает исключительно широкую область применения технологии горячего литья, так как обеспечивает возможность изготовления керамических из-

делий из любых минеральных композиций, начиная от чистых окислов и кончая многокомпонентными сложными составами. Составы, не пригодные для непосредственного применения, могут быть путем предварительного обжига переведены в соответствующее состояние. Таким образом, проблема изготовления изделий из однокомпонентных материалов (Al_2O_3, BeO, ZrO_2 и т. п.) и различных других «непластичных» порошков получила свое практическое решение на основе применения технологии горячего литья. Наиболее широкое применение технология горячего литья получила в области электро- и радиокерамики, где она обеспечила получение высококачественных изоляторов и высокую эффективность.

Следует отметить, что наряду с решением задач прикладного порядка создание технологии горячего литья привело к решению целого ряда теоретических вопросов.

В настоящее время в электро- и радиотехнике еще совершенно недостаточно используются возможности технологии горячего литья керамических изделий (например, для изготовления вакуумной керамики и т. п.). В ряде областей, где горячее литье под давлением может дать исключительно большой эффект, эта технология еще вообще не получила применения. Так, например, горячее литье под давлением может с успехом применяться для производства из керамики высокохудожественных изделий, бытовой и лабораторной посуды и т. д., но до сих пор такие производства еще не организованы. В то же время применение технологии горячего литья для изготовления перечисленных изделий может обеспечить массовый выпуск высококачественных и дешевых изделий для народного потребления. Следует учесть при этом, что производство всех этих видов изделий может быть успешно организовано повсеместно на основе местных сырьевых ресурсов, так как технология горячего литья обеспечивает возможность применения любых непластичных минералов, не требует обязательного использования высококачественных глин, сложного оборудования и больших производственных площадей.

Особенно большие перспективы применения технология горячего литья имеет в области машиностроения для изготовления из высококачественных непластичных материалов деталей машин, режущего и измерительного инструмента. Несомненно, что рациональное использование технологии горячего литья керамических изделий может принести большую пользу народному хозяйству нашей страны.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВЫ И ОБЩАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО ЛИТЬЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КЕРАМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Несмотря на то, что производство керамических изделий существует с незапамятных времен,« оно до сих пор очень мало обосновано подлинно научными данными, позволяющими наиболее рационально построить производственный процесс. Больше того, это производство вообще не имеет еще отправных, обобщающих положений, составляющих основу теории производства, открывающих перспективы, подсказывающих пути, по которым надо идти в поисках наиболее рациональных практических решений».

Это замечание советского инженера-новатора А. В. Ярошевского [Л. 3], сделанное в 1946 г., к сожалению, до сего времени еще в значительной мере остается справедливым.

Если посмотреть даже самые фундаментальные труды [Л. 4, 5, 6, 7] по технологии керамических изделий, то легко убедиться, что они далеко не полностью освещают зависимость свойств изделий от технологии их изготовления и представляют собой лишь краткое описание технологических процессов производства керамических изделий различного назначения.

В своей теоретической части эти труды касаются главным образом:

а) вопросов образования керамических материалов, обладающих определенными свойствами;

б) вопросов термической обработки и связанных с нагревом изменений и превращений, протекающих в керамическом материале (сушка и обжиг);

в) теории пластичности.

Эти вопросы, бесспорно являющиеся весьма важными, однако ни в коей мере не решают всех ведущих вопросов

керамической технологии. Так, например, один из актуальнейших вопросов — вопрос создания обобщенной, научно обоснованной системы построения технологии керамических изделий — до сего времени остается почти не затронутым.

В результате этого развитие керамической технологии отстает от наиболее передовых отраслей техники, таких, например, как металлообрабатывающая.

Это отставание является в значительной степени также результатом того, что керамическая технология, представляющая собой комплексную науку с огромным количеством сложных вопросов, не дифференцирована на более узкие самостоятельные разделы науки, как это имеет место в других отраслях техники.

В настоящее время керамическая технология раздроблена на разделы, построенные по признаку назначения керамического материала: строительная керамика, огнеупорная керамика, электрокерамика и т. п.

В каждом разделе обособленно рассматриваются и изучаются все вопросы керамики, начиная с исходного сырья, получения материалов, технологии изделий и т. д. и кончая получением готовой продукции.

Это приводит, с одной стороны, к распылению сведений о технологии керамических изделий по различным разделам и, с другой стороны, к ненужному повторению одних и тех же положений в различных разделах.

Для обеспечения рационального решения возникающих в керамической технологии новых задач и дальнейшего ее прогресса представляется совершенно необходимым дифференцировать керамическую технологию на научные разделы по аналогии с другими отраслями техники. В связи с этим технология горячего литья нами подразделена на следующие самостоятельные, но неразрывно связанные между собой разделы:

1. Керамическое материаловедение.
2. Технология керамических материалов.
3. Технология керамических изделий.

В качестве примеров аналогичного построения разделов науки в других отраслях техники можно привести имеющиеся разделы в металлообработке:

1. Металловедение.
2. Металлургия.
3. Технология машиностроения.

1. Керамическое материаловедение должно изучать и решать вопросы рационального построения керамических

материалов, обладающих определенными свойствами. В группу вопросов керамического материаловедения должны входить:

а) изучение свойств исходных сырых материалов;

б) изучение свойств различных кристаллов и стекол;

в) изучение и разработка синтеза различных кристаллов и стекол;

г) изучение влияния различных факторов (состав, структура, природа исходного сырья, температурный режим и т. д.) на процесс спекания и свойства керамического материала;

д) изучение структуры и разработка композиций керамических материалов, обладающих определенными свойствами;

е) изучение свойств материалов и разработка методов определения различных свойств материалов.

2. Технология керамических материалов должна включать:

а) разработку рациональных технологических методов приготовления различных минеральных композиций;

б) изучение и разработку методов диспергирования и фракционирования минеральных порошков;

в) разработку агрегатов и машин для осуществления процессов приготовления минеральных порошков и решение вопросов механизации и автоматизации процессов;

г) разработку и изучение методов кондиционирования и контроля свойств и стабильности структурно-минералогического состава минеральных композиций (порошков).

3. Технология керамических изделий должна решать вопросы образования изделий из различных керамических материалов с сохранением свойств, присущих данному материалу в изделии.

К числу основных задач этого раздела должны быть отнесены:

а) изучение и разработка методов образования промежуточных систем (формующихся масс) из различных минеральных композиций — пластичных и непластичных;

б) изучение и разработка методов оформления изделий из различных минеральных композиций;

в) разработка научных основ технологии керамического полуфабриката;

г) разработка агрегатов и машин для изготовления керамических изделий и решение вопросов механизации и автоматизации процессов;

д) изучение влияния технологических факторов на свойства материала в изделии и поведение образца в обжиге (огневые усадки и т. д.);

е) изучение вопросов взаимозаменяемости керамических деталей (точности размеров) и разработка инструментов и приспособлений для осуществления технологии изготовления керамических изделий.

Приведенный далеко не полный перечень вопросов, затрагиваемых каждым разделом, однако в достаточной мере показывает, как велик круг задач по каждому из разделов. Естественно, что объединение всех этих вопросов в одной науке, как это имеет место сейчас в керамической технологии, является нерациональным и приводит к недостаточному развитию отдельных разделов науки и серьезным затруднениям в решении современных проблем.

В результате керамическая технология в целом прогрессирует крайне медленно и находится на значительно более низком уровне, чем другие отрасли техники.

Расчленение науки о керамической технологии на три самостоятельных раздела приводит к возможности создания специализированных заводов по производству керамических материалов и керамических изделий и способствует существенному углублению научных разработок. В настоящее время наиболее отсталым в смысле развития научных основ является раздел технологии керамических изделий.

Сущность и основные отличительные особенности технологии керамических изделий для любого состава и назначения материала являются одинаковыми, поэтому представляется возможным и необходимым обобщить основные положения технологии керамических изделий в систему [1], восполнить имеющиеся пробелы и создать хотя бы в первом приближении теоретические основы технологии керамических изделий.

Схема, определяющая и объединяющая весь комплекс вопросов получения керамических изделий, состоит из двух звеньев: порошок — изделие (фиг. 1,*а*). Эта схема определяет основной смысл технологии керамических изделий — получение керамических изделий из минеральных порошков путем объединения частиц порошка в монолит (керамический материал) с соблюдением определенной формы.

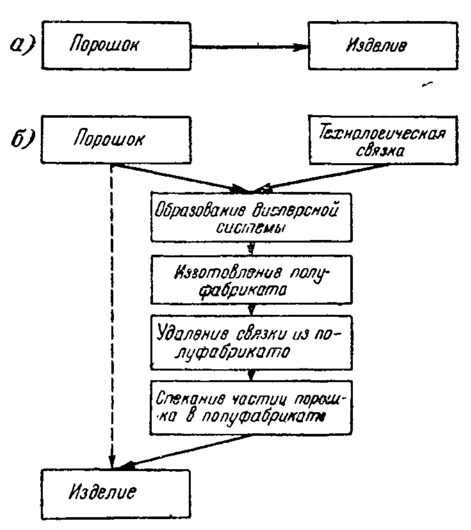
[1] Первая попытка в этом направлении была сделана нами при анализе существующих методов изготовления керамических изделий и постановке вопроса о структуре полуфабриката [Л. 8].

Это достигается путем осуществления ряда специфических, присущих керамической технологии приемов.

Обычный путь керамической технологии идет через образование промежуточной структуры к окончательной структуре.

Образование промежуточной структуры (полуфабриката) является этапом, необходимым для создания необходимой формы изделия.

Однако этот путь не всегда обязателен; известны работы в области керамической технологии, направленные на получение окончательной формы изделий непосредственно из минерального порошка (горячее прессование). В этом случае образование промежуточной системы отпадает. Эти работы, однако, еще не получили должного развития и ведущим направлением является образование керамических изделий через промежуточные системы, т. е. оформление полуфабриката, а затем обжиг его для получения окончательной структуры материала и изделия.



Фиг. 1. Общая схема керамической технологии.

Существует большое число разнообразных технологических схем изготовления керамических изделий. Все эти схемы по принципу своего построения, однако, однозначны и могут быть сведены в следующую общую для всей керамической технологии схему (фиг. 1).

Общая технологическая схема получения керамических изделий состоит, таким образом, из четырех основных этапов, которые являются необходимыми промежуточными ступенями для превращения исходного порошка в изделие.

Первый этап — образование дисперсной системы порошок — связка — необходим для обеспечения технологической возможности получения изделия необходимой формы, так как непосредственно из минерального порошка оформить изделия представляется почти невозможным из-за весьма незначительной силы сцепления между частицами минерального порошка и малого числа точек контакта у частиц друг с другом.

В связи с этим дисперсная система порошок — связка должна обладать свойствами, необходимыми для использования ее в качестве промежуточного материала для придания формы изделию.

Второй этап — изготовление полуфабриката — имеет своей целью, используя возможности промежуточных дисперсных систем, оформить изделие (в полуфабрикате) заданной конфигурации и необходимых размеров с учетом последующих объемных изменений, происходящих при объединении частиц порошка в монолит.

Третий этап — удаление связки из полуфабриката — является необходимым для подготовки полуфабриката к спеканию. В результате удаления связки в полуфабрикате должна остаться только минеральная часть, т. е. та часть полуфабриката, из которой в последующем образуется керамическое изделие.

Удаление связки, как правило, является термическим процессом.

Четвертый этап — спекание частиц порошка, находящихся в полуфабрикате, в монолитное изделие — достигается путем соответствующего нагрева и является основным завершающим этапом керамической технологии.

Все перечисленные этапы могут иметь большое число технологических вариантов их осуществления, но общая направленность и смысл этих этапов остаются едиными для всех этих вариантов.

В зависимости от характера, природы и свойств исходного порошка и связки технологический процесс изготовления и даже физико-химические явления, протекающие при этом процессе, могут изменяться, но сущность и вышеприведенный общий принцип сохранения перечисленных выше

промежуточных ступеней (этапов) перехода от порошка к изделию остаются постоянными.

Рассмотрим сущность явлений, протекающих в этих этапах.

2. СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКОГО ПОЛУФАБРИКАТА

Одной из основных отличительных особенностей керамической технологии является наличие переходной ступени (в виде промежуточной системы), обеспечивающей процессы оформления изделия (полуфабриката). Эта переходная ступень характеризуется созданием временной, промежуточной, системы из исходных твердых материалов и технологической связки.

Как правило, в обычной керамической технологии исходными твердыми материалами являются природные минералы (глины, каолины, тальки, шпаты и т. п.), а роль технологической связки выполняют вода, водные растворы органических веществ или смеси воды с другими веществами.

Промежуточные системы в обычной керамической технологии в зависимости от концентрации связки могут находиться в различных агрегатных состояниях: при увеличении количества связки (более 24% весовых) — в жидком; при уменьшении связки полуфабрикат переходит через тестообразное, пластичное (при 17—24%) в твердое состояние.

Изменения агрегатного состояния при изменении количества связки используются как технологический прием для фиксации формы изделия.

Свойства и структура этой промежуточной системы резко отличаются от свойств и структуры материала в готовом (обожженном) изделии.

При обжиге из промежуточной системы полностью удаляется технологическая связка, а компоненты минеральной части изменяются: дегидратируют или диссоциируют, вступают в реакции между собой, образуют новые кристаллические соединения и стеклофазу, т. е. собственно керамический материал.

Известен другой, новый способ керамической технологии, отличающийся тем, что приготовляется промежуточная система, которая изменяет свое агрегатное состояние не за счет количества технологической связки, а за счет изменения ее температуры (твердая до +35, +40°; жидкая при 50° и выше).

Эта промежуточная система также состоит из тонкодисперсного твердого материала и технологической связки, но свойства и структура твердого материала как в промежуточной системе, так и в готовом изделии одинаковые, т. е. в системе применяется готовый керамический материал, измельченный в порошок.

Тем не менее структура и этой промежуточной системы отличается от структуры обожженного изделия наличием связки и меньшей плотностью упаковки твердых частиц.

При обжиге из этой промежуточной системы связка полностью удаляется, а готовые твердые частицы материала объединяются в монолит, не изменяя (точнее, почти не изменяя) своего состава и свойств.

Это обстоятельство является весьма существенным, так как предопределяет существенное уменьшение объемных изменений, претерпеваемых системой при обжиге (уменьшаются огневые усадки), и способствует стабилизации технологического процесса.

Образование промежуточной системы протекает в результате смешивания того или иного порошка с соответствующей технологической связкой и является первым этапом структурообразования керамического полуфабриката.

В результате технологического процесса приготовления дисперсной системы и оформления из нее изделия (полуфабриката) создается структура полуфабриката, которую можно в общем виде рассматривать как состоящую из:

1) твердой фазы (частиц минерального порошка);
2) технологической связки.

Твердая фаза (минеральный порошок) является основной составляющей структуры, так как из нее формируется керамическое изделие при дальнейшем ходе технологического процесса.

Характер распределения минеральных частиц в объеме полуфабриката представляет наибольший интерес и значение, так как именно эта сторона структуры полуфабриката влияет на поведение образца в обжиге и свойства изделия.

Определяющими параметрами минерального скелета структуры полуфабриката можно считать: а) степень заполнения единицы объема полуфабриката частицами минерального порошка и б) однородность структуры во всех элементах объема.

Степень заполнения единицы объема полуфабриката частицами минерального порошка обычно именуется плотностью упаковки (укладки) частиц. Эта плотность упаковки

может характеризоваться процентом заполнения единицы объема минеральными частицами, или процентом пористости, или, что одно и то же, коэффициентом заполнения объема или коэффициентом пористости.

Наиболее правильно принять за величину, характеризующую плотность упаковки, коэффициент заполнения единицы объема полуфабриката минеральными частицами, назвав его для упрощения термина коэффициентом упаковки K. Выбор в качестве критерия коэффициента упаковки, а не пористости вызван тем обстоятелсьтвом, что обычно мы имеем дело с керамическим полуфабрикатом, представляющим собой систему технологическая связка — минеральный порошок, а не воздух — минеральный порошок. Таким образом, представление о коэффициенте пористости выглядело бы в большей мере условным, чем действительным параметром, так как фактически все поры между частицами порошка заполнены связкой. Определение коэффициента упаковки методически не вызывает затруднений. В то же время коэффициент упаковки характеризует наиболее существенную сторону структуры полуфабриката с точки зрения дальнейшего формирования черепка, давая количественную оценку минеральной составляющей структуры полуфабриката. Математически коэффициент упаковки определяется отношением веса минеральных частиц, фактически уложенных в единице объема полуфабриката, к истинному удельному весу минеральной части:

$$K = \frac{P_м}{\gamma_м},$$

где $P_м$ — вес минеральных частиц, фактически находящихся в 1 *см*³ полуфабриката, *г*;

$\gamma_м$ — удельный вес минерального порошка.

Однородность структуры или, точнее, равномерность распределения минеральных частиц в объеме полуфабриката можно количественно характеризовать тем же коэффициентом упаковки, сопоставляя его значения в различных элементах объема. В соответствии с этим равномерность распределения минеральных частиц, или равномерность упаковки, математически можно оценить отношением:

$$R = \frac{K_{макс}}{K_{мин}},$$

где $K_{мин}$ — минимальное значение коэффициента упаковки в объеме данного полуфабриката;

$K_{макс}$ — максимальное значение коэффициента упаковки в объеме данного полуфабриката;

R — коэффициент неравномерности.

Значение равномерности упаковки с точки зрения ее влияния на поведение образца в обжиге и его конечные свойства весьма велико.

Наличие отдельных элементов объема или части объема с пониженной или повышенной плотностью упаковки минеральных частиц приводит к целому ряду дефектов, проявляющихся в результате обжига или остающихся внешне скрытыми, но, повидимому, имеющими место в обожженном изделии.

Можно считать, что разнообразные виды брака в производстве керамических изделий во многих случаях являются результатом неравномерности структуры. Основными последствиями неравномерности структуры полуфабриката, проявляющимися после обжига, могут быть:

1) деформация образца;
2) появление трещин;
3) возникновение внутренних напряжений;
4) неравномерность огневой усадки в различных участках образца.

Нельзя считать неравномерность упаковки минеральных частиц в полуфабрикате единственной причиной появления дефектов. Дефекты могут появляться и от других причин, например вследствие неравномерности развития температур, испытываемого изделием в обжиге, механических нагрузок и других причин. Однако значение фактора неравномерности упаковки в появлении этих дефектов можно считать доминирующим.

Справедливость выдвинутых положений о количественном критерии качества полуфабриката подтверждается экспериментальными данными.

Эти эксперименты, проводившиеся нами с использованием различных по свойствам материалов, показали, что оптимальная структура полуфабриката характеризуется максимальной плотностью упаковки частиц с коэффициентом упаковки, стремящимся к единице, и равномерностью упаковки с коэффициентом неравномерности, равным единице.

Это положение может быть принято как исходное при выборе технологического процесса изготовления полуфабриката, т. е. определенного способа его структурообразования.

На фиг. 2 и 3 приведены фотографии микроструктуры образцов из муллитового материала, полученных путем обжига полуфабриката с различной плотностью упаковки частиц. Как видно из приведенных фотографий, образец, полученный из полуфабриката с пониженным коэффициентом упаковки, имеет значительно увеличенную закрытую пористость (темные пятна на фотографии), что ухудшает свойства изделия (см. вклейку).

Процесс структурообразования керамического полуфабриката можно расчленить на три основных этапа:

1) образование системы;
2) формообразование полуфабриката;
3) фиксация структуры.

Структура полуфабриката является результатом всех этапов ее образования и, следовательно, зависит от особенностей и методов осуществления каждого этапа, а также от свойств исходных компонентов, образующих структуру.

Как уже упоминалось, первым этапом структурообразования полуфабриката является образование промежуточной системы из соответствующего минерального порошка и технологической связки.

Процесс образования системы в своей сущности сводится к адсорбции поверхностью частиц порошка молекул технологической связки при участии по мере необходимости поверхностно-активных веществ (далее будем сокращенно писать ПАВ).

Основными факторами, влияющими на структурное состояние и свойства системы, являются:

а) свойства минеральной части;
б) свойства технологической связки;
в) количественное соотношение компонентов системы (минеральная часть — связка);
г) дисперсность и гранулометрический состав минеральной части;
д) процесс смешивания компонентов.

В зависимости от свойств компонентов системы (минеральной части и связки) существенно изменяется характер адсорбции связки на поверхности минеральных частиц, что влечет изменение свойств системы (механической прочности и пр.).

Существенная роль количественного соотношения компонентов заключается в том, что повышение количества связки влечет уменьшение плотности упаковки минеральных частиц,

зависящей также от дисперсности и гранулометрического состава минерального порошка.

Известно, что если условно принять форму частиц за шарообразную, то при равной величине частиц — шаров идеальная укладка даст заполнение объема 74,05% независимо от абсолютного значения величины частиц [Л. 9 и 10].

Более эффективное заполнение объема возможно только при наличии определенного количества меньших частиц для заполнения пустот между более крупными частицами. Это положение говорит о необходимости выбора, соответствующего наиболее плотной укладке, гранулометрического состава смеси.

Для случая идеальной упаковки путем математического расчета Уайт и Валтон [Л. 9] установили размеры и соотношения частиц (шаров) разных размеров для обеспечения наиплотнейшей упаковки.

Указанные соотношения, однако, являются чисто теоретическими в силу того, что укладка минеральных частиц в соответствующей оптимальной взаимной ориентации не имеет практического решения.

Как установлено из многочисленных опытов ряда исследователей (Л. А. Шмелев [Л. 10], Д. Н. Полубояринов [Л. 11] и др.), при использовании реальных минеральных смесей (грубодисперсных) в большинстве случаев, даже при соответствующем подборе гранулометрического состава, процент заполнения объема минеральной частью составляет 60% ($K_{\text{у}n} = 0{,}6$).

При рассмотрении упаковки тонкодисперсных минеральных частиц следует ввести некоторые дополнительные уточнения, так как необходимо учитывать, что в результате процесса образования системы на каждой частице образуется адсорбционный слой технологической связки. Размеры частиц как бы увеличиваются на величину 2Δ (где Δ — толщина адсорбционного слоя связки). При малых размерах частиц (1—10 *мкн*) эти слои существенно изменяют кажущийся размер частиц (до 20%).

В соответствии с этим выбор гранулометрического состава тонкодисперсных порошков должен производиться с учетом образующихся на минеральных частицах слоев адсорбированной связки.

Наряду с рассмотренными факторами серьезное значение при образовании системы имеет процесс смешивания компонентов, задачей которого является равномерное распределение технологической связки в системе.

В результате первого этапа структурообразования керамического полуфабриката осуществляется объединение минеральных частиц в промежуточную дисперсную систему.

Полученное структурное состояние системы в дальнейших этапах структурообразования подвергается некоторым изменениям. Во втором этапе протекает процесс формообразования полуфабриката, заключающийся в перемещении минеральных частиц в системе, в результате которого частицы материала заполняют объем определенной формы и приобретают определенную взаимную ориентацию.

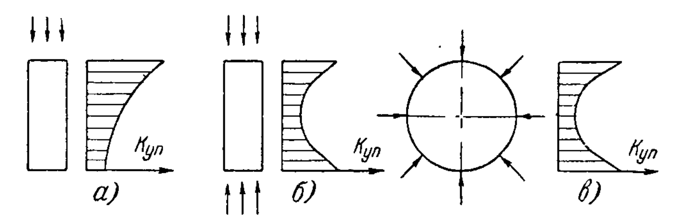
Анализ существующих технологических методов позволяет подразделить все способы формообразования в зависимости от характера сил, осуществляющих перемещение частиц, на формообразования под действием гравитационных сил, центробежных сил и внешних сил.

Принципальное отличие друг от друга этих групп заключается в том, что в первых двух случаях силы, осуществляющие перемещение частиц, являются объемными силами, следовательно, непосредственно приложены к каждой элементарной частице, а в третьем случае действующие силы непосредственно приложены только к ограниченному числу частиц, которое определяется площадью поверхности, к которой приложены силы.

При этом силы, действующие на каждую частицу, в первом случае близки по значению друг к другу; во втором случае отличаются по величине друг от друга в элементах объема, находящихся на различных расстояниях от центра вращения; в последнем случае существенно отличаются друг от друга в разных элементах объема (в тех случаях, когда система не полностью следует закону Паскаля для жидкостей). При применении жидких систем формообразование под действием внешних сил не приводит к неравномерному распределению сил. Характер распределения сил, действующих при формообразовании, и их величина оказывают определенное влияние на структуру полуфабриката. Влияние характера действующих сил на структуру видно из приведенных на фиг. 4—8 фотоснимков (см. вклейку) макроструктуры полуфабриката и схем распределения плотности упаковки (фиг. 9) в зависимости от направления сил.

Величина действующих сил отражается на плотности структуры полуфабриката (плотности упаковки минеральных частиц). Указанное наглядно иллюстрируется общеизвестным фактом уплотнения структуры при повышении давления прессования и данными, полученными нами при

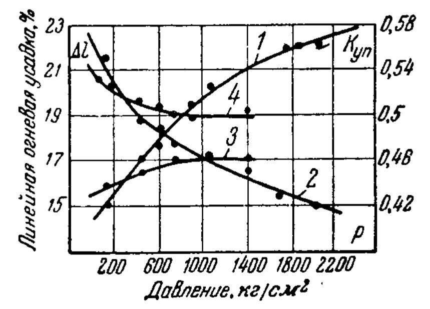
экспериментировании с использованием центробежных сил. На фиг. 10 и 11 показано изменение плотности упаковки частиц в полуфабрикате (и имеющие обратный характер



Фиг. 9. Схема распределения плотности упаковки минеральных частиц в зависимости от направления действующих сил.

а — при одностороннем приложении сил (прессование); *б* — при двустороннем приложении сил (прессование); *в* — при радиальном направлении сил (протягивание).

кривые огневых усадок) в зависимости от давления при прессовании и в зависимости от окружной скорости, при центробежном литье определяющей величину сил, действующих на каждую частицу.



Фиг. 10. Зависимость плотности упаковки частиц и огневой усадки от величины давления при прессовании.

1 — изменение $K_{уп}$ при прессовании пресспорошка с 7% связки; *2*—изменение огневых усадок при прессовании пресспорошка с 7% связки; *3* — изменение $K_{уп}$ при прессовании пресспорошка с 20% связки; *4* — изменение огневых усадок при прессовании пресспорошка с 20% связки.

Как видно из фиг. 11, увеличение скорости, а следовательно, и величины действующих сил, приводит к повышению K и уменьшению огневой усадки, что свидетельствует об уплотнении структуры.

Наличие в различных элементах объема полуфабриката при его формообразовании различных по величине сил (как это имеет место при использовании центробежных и внешних сил, за исключением случая действия внешних сил на жидкие системы) влечет образование неоднородной структуры — неравномерной упаковки частиц в полуфабрикате, что приводит к ряду дефектов и ухудшению свойств изделия.

Таким образом, оптимальным способом формообразования, повидимому, является формообразование полуфабрика-

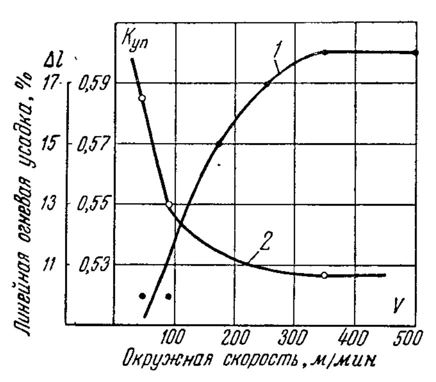
та действием гравитационных или внешних сил на жидкую систему.

Последним этапом структурообразования полуфабриката является фиксация структурного состояния системы в данном объеме и форме. Процесс фиксации может осуществляться: частичным удалением связки из системы, изменением агрегатного состояния системы, увеличением площади контакта между частицами системы.

Первый способ хорошо известен и широко применяется в обычной керамической технологии (литье в гипсовые формы, сушка).

Второй способ реализуется в случаях использования термопластических или термореактивных технологических связок путем соответствующего изменения температур (нагрев и охлаждение).

Третий способ используется при использовании систем в виде пресспорошков.



Фиг. 11. Зависимость плотности упаковки частиц и огневой усадки от окружной скорости при центробежном литье.

1 — изменение $K_{уп}$; *2* — изменение огневой усадки.

В процессе фиксации структурного состояния керамического полуфабриката первыми двумя способами наблюдается некоторое изменение характера структуры. При использовании первого способа эти изменения характеризуются изменением линейных размеров образца полуфабриката на 7—8%, а при использованнии второго способа — на 0,4—0,8%.

Исходя из этого, можно считать, что более рациональным способом фиксации структурного состояния системы является изменение ее агрегатного состояния.

В конечном итоге структура, а следовательно, и качество керамического полуфабриката, является результатом всех рассмотренных этапов структурообразования.

В производственной практике способы образования системы и фиксации структурного состояния обычно выбираются для керамического материала как постоянные,

а способы формообразования варьируются применительно к определенной конфигурации изделия.

Рассмотрим некоторые технологические методы формования изделий с точки зрения структуры и качества керамического полуфабриката.

Прессование — один из наиболее широко распространенных методов в керамической технологии. Формообразование происходит в результате приложения внешней силы (давления) на верхний и нижний ряды частиц с передачей давления через частицы, находящиеся в данном объеме. Так как применяемые керамические пресспорошки не подчиняются законам гидравлики, в результате процесса прессования наблюдается определенная неравномерность упаковки, выявляющаяся экспериментальным путем (см. фиг. 9).

Плотность упаковки при прессовании в известной мере зависит от приложенного давления (см. фиг. 10). С увеличением давления плотность полуфабриката увеличивается, однако при определенных значительных давлениях имеет место разрушение (перепрессовка и расслаивание) прессуемого образца.

Это явление ограничивает возможность применения процесса прессования для изготовления керамических изделий сложной конфигурации и может быть в ряде случаев вообще недопустимо.

Однако для изготовления плоских деталей прессование является приемлемым методом, обеспечивающим достаточно высокую производительность и удовлетворительное качество керамических деталей.

Протягивание через мундштук представляет собой процесс, использующий явления пластической деформации керамической массы (пластической системы).

Аналогично процессу прессования процесс формообразования происходит под влиянием воздействия внешних сил. Отличие от прессования заключается в несколько ином направлении действующих сил.

Это отличие предопределяет несколько иной характер неравномерности упаковки, чем при прессовании, сохраняя, однако, недостатки, присущие формообразованию действием внешних сил, что ограничивает область и желательность применения данного метода в ряде случаев.

Следует отметить, что изделия, оформленные методом протягивания, очень склонны к деформации в обжиге вслед-

ствие имеющейся неравномерности упаковки минеральных частиц.

Горячее литье в кокиль характеризуется процессом формообразования под действием гравитационных сил.

При литье в результате процесса формообразования получается достаточно равномерное распределение частиц в объеме. При фиксации структуры (изменением агрегатного состояния) это положение несколько изменяется, так как процесс фиксации влечет некоторые изменения структуры, в результате чего появляется определенная неравномерность упаковки.

Эти изменения объясняются тем, что при литье процесс фиксации структуры происходит, начиная с наружной поверхности полуфабриката, прилегающей к форме. В результате этого внутренний объем образца претерпевает процесс фиксации в иных условиях, чем наружные слои, и в образце возникают внутренние напряжения и неравномерность упаковки. При точно выбранных режимах или при применении «намораживания» эти дефекты, однако, могут быть устранены.

При литье сложность геометрической формы образца меньше влияет на равномерность упаковки, чем при прессовании и протягивании, что объясняется формообразованием — действием объемных сил (гравитационных).

Центробежное литье является своеобразным методом литья шликеров. Формообразование происходит под влиянием центробежных сил, действующих на каждое зерно минеральной смеси, что выгодно отличает его от некоторых других технологических методов. Этот метод образования изделия можно применять в случаях, когда необходимо получить изделие, представляющее собой тело вращения. Он может быть также применен для изделий другой формы при использовании специальных установок и форм для центробежного литья.

Имеющая место неравномерность упаковки объясняется разностью радиусов и, следовательно, окружных скоростей, вследствие чего частицы развивают разные центробежные силы; этим обусловливается неравномерность упаковки минеральных частиц, приводящая иногда к расслаиванию образца в обжиге.

Горячее литье под давлением является процессом, при котором формообразование осуществляется действием внешних сил. Так как внешние силы (давление)

действуют на жидкую систему (литейный шликер), подчиняющуюся законам гидравлики, то эти силы передаются равномерно по всему объему, что обеспечивает равномерность упаковки минеральных частиц в объеме полуфабриката. Фиксация структуры при горячем литье под давлением осуществляется путем изменения агрегатного состояния системы.

Вследствие того, что охлаждение идет под давлением, обеспечиваются компенсация объемных изменений и образование однородной структуры полуфабриката.

При правильном ведении процесса литья под давлением сложность конфигурации отливки не оказывает практически влияния на плотность и однородность структуры полуфабриката.

3. ОБРАЗОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ

Исходя из представлений, изложенных выше, керамический полуфабрикат представляет собой некоторое материальное тело, имеющее определенную геометрическую форму, объем которого слагается из объема минеральных частиц и объема технологической связки (частично возможно также наличие некоторого объема воздушных пузырьков).

Керамическое изделие образуется из минеральных частиц, находящихся в полуфабрикате, и, следовательно, объем готового керамического изделия будет равен объему минеральных частиц, имеющихся в полуфабрикате (в случае отсутствия воздушных пор в готовом керамическом изделии).

Объем минеральных частиц, находящихся в полуфабрикате, характеризуется коэффициентом упаковки:

$$V_м = K_{уп} V_{пф},$$

где $V_м$ — объем минеральных частиц, находящихся в полуфабрикате;

$K_{уп}$ — коэффициент упаковки;

$V_{пф}$ — объем полуфабриката.

Следовательно, коэффициент упаковки характеризует возможные объемные изменения полуфабриката при его преобразовании в готовое керамическое изделие.

Преобразование полуфабриката в готовое (спекшееся) керамическое изделие осуществляется за два основных этапа: удаление технологической связки и спекание (обжиг).

Основной задачей первого этапа является удаление технологической связки из полуфабриката с сохранением минерального скелета структуры полуфабриката без изменений.

Удаление связки из полуфабриката осуществляется путем его нагревания. При чрезмерно быстром течении процесса удаления связки из полуфабриката неизбежно нарушается его структура, поэтому для облегчения отбора связки в жидком состоянии с поверхности полуфабриката и смягчения режима нагрева процесс ведется в тонкодисперсной среде.

Тонкодисперсная среда (минеральный порошок) является адсорбентом, отбирающим на себя связку из полуфабриката при его разогреве.

В результате процесса удаления связки в полуфабрикате остаются только минеральные частицы, связанные друг с другом в точках контакта, и воздушные поры между ними.

Задачей второго этапа являются сближение частиц (вытеснение пор) и их объединение в монолитную систему — спекшийся керамический материал. Это достигается нагревом полуфабриката до соответствующей высокой температуры, обеспечивающей протекание процесса спекания. Механизм процесса спекания изменяется в зависимости от характера обжигаемого материала.

У однофазных материалов (например, из чистой окиси алюминия и т. п.) спекание идет путем рекристаллизации; у двухфазных и многофазных материалов обычно имеет место «жидкостное» спекание (за счет плавления стекловидной фазы).

В результате процесса спекания образуется готовое керамическое изделие, свойства которого зависят как от химического и фазового состава и микроструктуры материала, так и от технологии его изготовления, т. е. от структуры полуфабриката.

Если в процессе структурообразования полуфабриката получается определенная неравномерность распределения частиц в объеме, то в результате процесса спекания эта неравномерность может либо сохраниться, либо усугубиться, либо тем или иным путем компенсироваться в зависимости от состава и свойств стекловидной фазы керамического материала.

В случае наличия однофазного керамического материала при его нагреве до температуры спекания взаимодействие между частицами будет происходить в точках контакта, при

этом первичная ориентация частиц практически будет сохраняться неизменной, т. е. имевшая место в полуфабрикате неравномерность уплотнения частиц будет сохраняться почти до самого конца процесса спекания. В случае же спекания двухфазного керамического материала (т. е. состоящего из кристаллической и стекловидной фаз) в зависимости от свойств стеклофазы характер явлений, происходящих при спекании, будет существенно изменяться. В случае наличия высоковязкой стеклофазы явления, протекающие при спекании, будут аналогичны явлениям, протекающим при спекании однофазной системы, и, следовательно, первичная заложенная в полуфабрикате неравномерность уплотнения минеральных частиц после спекания будет отчасти сохраняться.

В случае наличия маловязкой стеклофазы последняя в процессе нагрева будет перераспределяться в черепке и заполнять пустоты, образованные в результате неравномерного уплотнения частиц в полуфабрикате.

Таким образом, керамические изделия из материалов с маловязкой стеклофазой после спекания будут иметь более однородную структуру, чем в случае наличия однофазных материалов или материалов с высоковязкой стеклофазой. В качестве примера керамических материалов, обладающих стеклофазой с высокой вязкостью, можно назвать электротехнический фарфор, а с малой вязкостью — стеатит.

В результате процесса спекания полуфабрикат неизбежно претерпевает объемные изменения, которые называют огневой усадкой. При этом следует отметить, что принятая в практике методика оценки огневой усадки (усадочный коэффициент) по изменениям линейных размеров образцов не дает достаточно полного и ясного представления о процессе спекания и имеющихся объемных изменениях.

Наиболее простую и полную оценку протекающих при спекании объемных изменений дает объемная огневая усадка, выраженная в процентах:

$$\Delta V = \frac{V_{пф} - V_{об}}{V_{пф}} \cdot 100\%,$$

где ΔV — объемная огневая усадка;

$V_{пф}$ — объем полуфабриката;

$V_{об}$ — объем обожженного (спекшегося) изделия.

Пользуясь понятием о коэффициенте упаковки, объем-

ная огневая усадка может быть выражена теоретически следующей формулой:

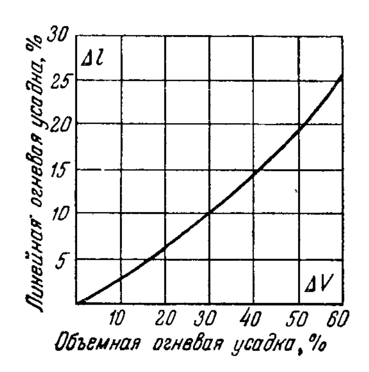
$$\Delta V = (1 - K_{уп}) \cdot 100\%.$$

Практически объемная огневая усадка всегда будет несколько меньше за счет того, что в керамическом изделии остается некоторый объем воздуха в виде закрытых пор.

Величина объема остающегося в изделии воздуха в виде закрытых пор зависит от целого ряда факторов и в первую очередь от температурного режима спекания, дисперсности и гранулометрического состава минерального порошка.

Обычно у спекшихся керамических материалов объем закрытых пор составляет 3—5%.

Зная коэффициент упаковки полуфабриката, можно с достаточной точностью судить об объемной огневой усадке, пользуясь вышеприведенной формулой.



Фиг. 12. Зависимость между линейной и объемной огневой усадкой.

Для удобства практического использования этой формулы на фиг. 12 приводится график зависимости между линейной огневой усадкой и объемной огневой усадкой.

4. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕГО ЛИТЬЯ

В основу технологии горячего литья положен следующий комплекс принципиальных положений.

1. Осуществление различных технологических методов придания формы изделию путем использования, в основном, не свойств твердого тела (материала), из которого изготовляется изделие, а свойств временно вводимой так называемой технологической связки, обеспечивающей создание промежуточной системы материал — связка, из которой оформляется изделие (полуфабрикат). Окончательно готовое изделие получается при соответствующей термической обработке полуфабриката.

2. Создание промежуточных систем материал — связка с высокой плотностью упаковки минеральных частиц, способных изменять свое агрегатное состояние при нагреве и

охлаждении, на основе: а) использования явления адсорбции и действия поверхностно-активных веществ; б) применения технологических связок, обладающих способностью изменять свое агрегатное состояние при изменении температуры, сохраняя постоянство объема или уменьшая свой объем при переходе из жидкого состояния в твердое; в) применения специальных устройств и методов, способствующих образованию систем (механическое смешивание и диспергирование в соответствующей среде и при повышенной температуре).

3. Применение промежуточных дисперсных систем для оформления изделий в жидком состоянии и использование принципа изменения агрегатного состояния промежуточной системы для фиксации формы изделия.

4. Использование адсорбционной способности минеральных порошков путем применения их в качестве среды при удалении технологической связки из полуфабриката.

5. Использование и применение опыта технологии и оборудования, принятых в технологии металлов для оформления керамических изделий.

Разработанная в соответствии с этими положениями принципиальная технологическая схема изготовления керамических изделий из непластичных материалов горячим литьем приведена на фиг. 13.

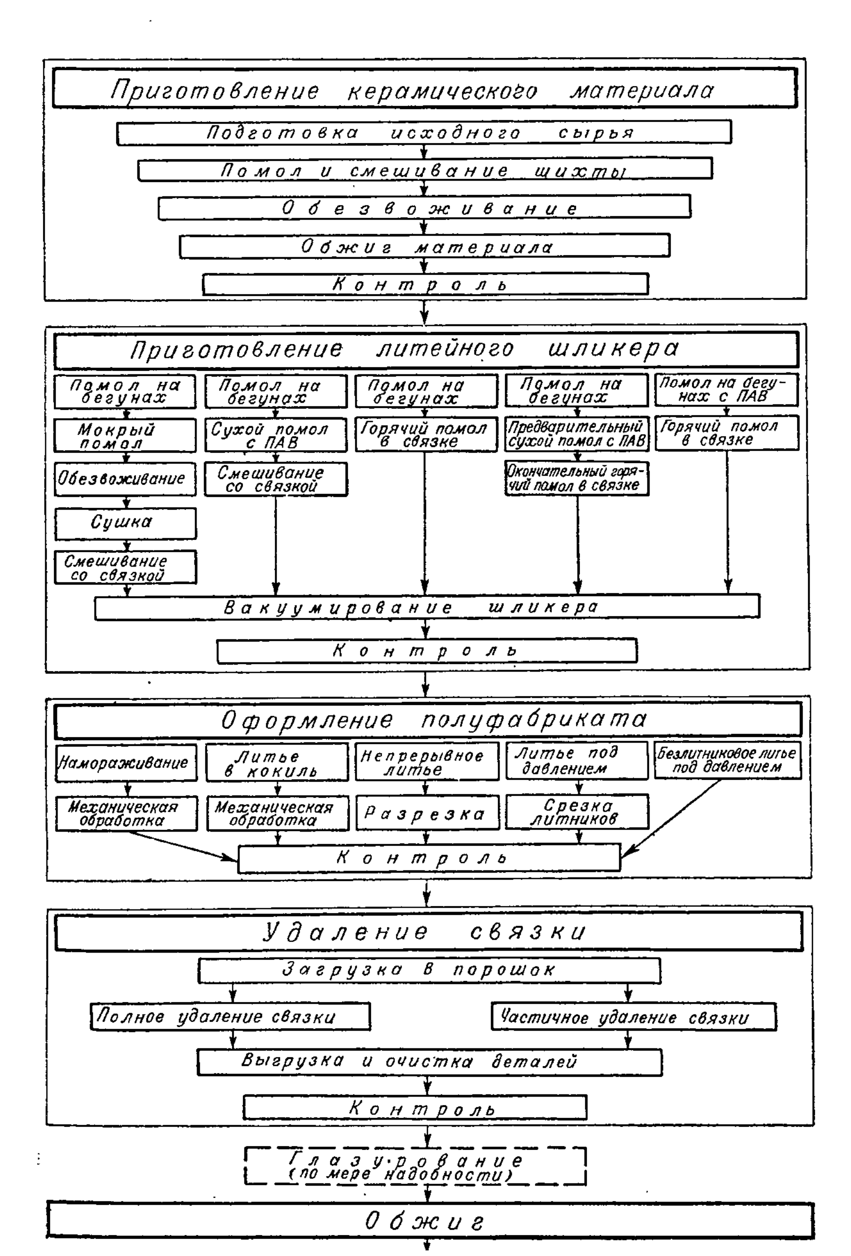
ГЛАВА ВТОРАЯ

ЛИТЕЙНЫЕ ШЛИКЕРЫ

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ПРИНЦИП ОБРАЗОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ШЛИКЕРОВ

Литейным шликером, применяемым для осуществления процесса горячего литья, называется дисперсная система, состоящая из минерального порошка (дисперсная фаза) и технологической связки (дисперсионная среда), обладающая способностью плавиться при повышении температуры и отвердевать при охлаждении.

Связка названа «технологической» для более четкого определения ее функций в системе и является веществом, временно вводимым для обеспечения необходимых технологических свойств системы с целью создания возможности оформить изделие из минерального порошка. После выполнения своих функций связка удаляется из полуфабриката,



Фиг. 13. Общая схема технологии горячего литья.

а керамическое изделие формируется из минерального порошка, остающегося в полуфабрикате полученной конфигурации.

Как уже упоминалось, сущностью процесса образования литейного шликера (системы) является адсорбция связки на поверхности частиц порошка.

В результате адсорбции на поверхности минеральных частиц образуются тонкие слои связки, снижающие свободную поверхностную энергию частиц и обеспечивающие взаимную относительную подвижность этих частиц в системе — текучесть системы.

Минеральный порошок является основой системы, так как из него в дальнейшем (при спекании) образуется керамическое изделие.

Литейный шликер может быть приготовлен из самых разнообразных минеральных и других порошков: из природных минералов, синтетических керамических материалов, стекол, карбидов и т. п.

Технологическая связка является веществом (или составом), временно объединяющим частицы порошка в систему и, в основном, предопределяющим свойства этой системы.

В качестве технологических связок для приготовления литейных шликеров применяются органические термопластичные вещества (парафины, воски и т. п.) с добавками поверхностно-активных веществ (жирные кислоты и т. п.).

При этом следует отметить, что свойства системы (и связки в системе) не будут точно соответствовать свойствам вводимой связки, а в зависимости от поверхностных свойств частиц порошка могут существенно изменяться. Так, например, механическая прочность системы (литейного шликера) в твердом состоянии будет различная у систем из разных порошков и, как правило, выше механической прочности связки в твердом состоянии. В табл. 1 приведены экспериментальные данные определения механической прочности на изгиб стандартных образцов, изготовленных из систем с разными минеральными порошками, при прочих равных условиях.

Как видно из приведенных данных, механическая прочность системы выше прочности связки.

Повышение механической прочности связки в системе может быть объяснено адсорбционным эффектом — уплотнением связки на поверхности минеральных частиц.

Таблица 1

Наименование системы	Прочность на изгиб, *кг/см²*	Условия опыта
Чистая связка	22	Температура образца 24°, форма образца — круглый стержень ∅ 12 *мм*
80% порошка муллита, 20% связки	32,0	Испытания проводились на приборе Михаэлиса
80% порошка клиноэнстатита, 20% связки	64,0	Связка одинакового состава и из одной партии приготовления
75% порошка коракса, 25% связки	25,0	

Как показывают экспериментальные данные [Л. 1], плотность парафиновой связки в адсорбционных слоях увеличивается от 0,89 (в нормальных условиях) до 1,0—1,1 *г/см³*. Естественно ожидать при столь значительном уплотнении вещества повышения его механической прочности.

Процесс приготовления литейного шликера заключается в смешивании порошка со связкой при соответствующей температуре.

Образующийся в результате смешивания порошка со связкой литейный шликер обладает рядом специфических свойств, зависящих от методики приготовления и свойств исходных компонентов (порошка и связки).

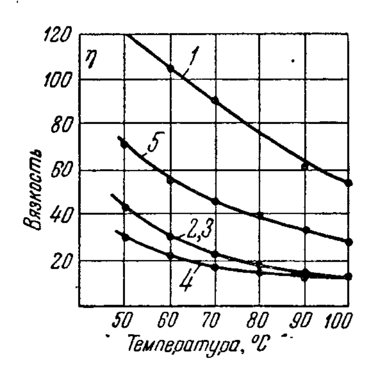
2. СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ ШЛИКЕРОВ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Основными параметрами, характеризующими технологические свойства литейных шликеров, являются: 1) вязкость, 2) скорость затвердевания, 3) литейная способность, 4) усадка при охлаждении, 5) плотность упаковки минеральных частиц, 6) устойчивость, 7) механическая прочность в твердом состоянии.

Кроме перечисленных параметров, дополнительными характеризующими свойствами литейных шликеров являются теплопроводность, теплоемкость, твердость, обрабатываемость, диэлектрические свойства (E, $\mathrm{tg}\,\delta$, ε) и стабильность при хранении.

Рассмотрим значение каждого из основных параметров и методику их определения.

1. Вязкость. Способность шликера заполнять форму основывается на его подвижности. При осуществлении процесса литья необходимо непрерывное поступление шликера в форму, что возможно только при определенном значении вязкости. Следовательно, вязкость является одной из основных характеристик шликера.



Фиг. 14. Зависимость вязкости литейного шликера от температуры.

1 — муллитовый шликер; 2 — клиноэнстатитовый шликер; 3 — рутиловый шликер; 4 — корундовый шликер; 5 — цирконовый шликер.

Практическое определение вязкости производится вискозиметрами.

Несмотря на наличие весьма разнообразных методов определения вязкости [Л. 12, 13, 14], выбор и разработка методики определения вязкости литейных шликеров представляли затруднения вследствие некоторых особенностей.

а) Измерение вязкости должно происходить при повышенной против комнатной температуре, которая должна выдерживаться достаточно точно на одном уровне, так как существует довольно резкая зависимость вязкости шликера от температуры.

В табл. 2 и на диаграмме фиг. 14 приведены экспериментально установленные зависимости вязкости литейных шликеров из различных материалов от температуры.

Таблица 2

Наименование литейного шликера	Время истечения (вязкость), (сек.) при температурах, °C					
	50°	60°	70°	80°	90°	100°
Муллитовый	120	105	92	80	60	53
Клиноэнстатитовый	42	30	20	19	16	14
Рутиловый	—	30	22	19	13	11
Корундовый	30	22	16	15	14	13
Цирконовый	70	55	45	40	32	25

Как видно из приведенных данных, вязкость литейных шликеров уменьшается при повышении температуры. Это

обстоятельство требует применения надежных термостатов и осложняется низкой теплопроводностью системы (шликера).

б) Горячие литейные шликеры обладают относительно широким диапазоном значения вязкости при различных температурах, что представляет некоторые затруднения, так как обычно той или иной методикой определения вязкости обеспечивается довольно узкой диапазон измеряемых значений вязкости.

в) Литейный шликер является не обычной жидкостью, а дисперсной системой, причем максимальные размеры частиц дисперсной фазы достигают величины 40—60 *мкн*. Это исключает применение ряда методов определения вязкости, например капиллярного.

В результате анализа всех существующих методов измерения вязкости и экспериментальной проверки некоторых из них установлено, что приемлемы вискозиметры, основанные на методе коаксиальных цилиндров (например, вискозиметр Воларовича) и методе падающих шариков.

Метод падающих шариков дает возможность измерять высоковязкие жидкости и в то же время требует сравнительно легко выполнимой в техническом отношении аппаратуры. Но вследствие того, что литейный шликер представляет собой непрозрачную жидкость, может быть использован лишь видоизмененный метод падающего шарика — с частично уравновешенными шариками.

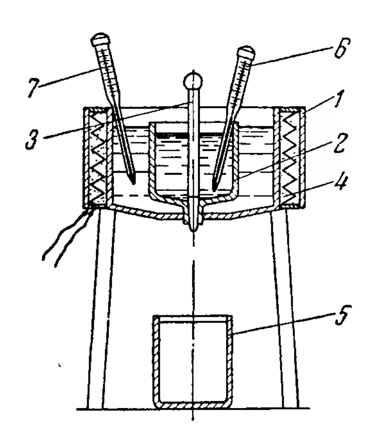
В производственных условиях наиболее удобным и приемлемым методом является определение вязкости с помощью технического вискозиметра типа Энглера. Этот метод определения вязкости является недостаточно точным и лишь относительным методом измерения. Однако простота конструкции и удобство для производственных и технических измерений привели к выбору его в качестве основного прибора для измерения вязкости при технологических исследованиях.

Для определения вязкости горячих литейных шликеров вискозиметр типа Энглера был несколько реконструирован в связи с технологическими особенностями горячих литейных шликеров. Схема такого вискозиметра представлена на фиг. 15.

Вискозиметр состоит из следующих основных частей: кожуха (водяной бани) *1*, рабочей камеры *2*, штыря *3*, закрывающего выходное сечение, электрической обмотки *4*, сосуда-приемника *5*, термометров *6* и *7*.

Кожух представляет собой металлический цилиндр с наружным диаметром 136 *мм* и внутренним 126 *мм*, высотой 122 *мм*, снабженный тремя ножками для установки на столе. В центре дна цилиндра имеется резьбовое отверстие для крепления рабочей камеры.

Рабочая камера представляет собой металлический цилиндр диаметром 44 *мм* и толщиной стенок 1 *мм*, с коническим дном и конусным выходным отверстием. Диаметр выходного отверстия 7 *мм* ±0,05. Материал для изготовления цилиндра должен обладать высокой теплопроводностью (например, медь, латунь). Внутри рабочей камеры нанесена риска на высоте, обеспечивающей объем камеры до риски 190 *см*³.



Фиг. 15. Вискозиметр.

1 — кожух; *2* — рабочая камера; *3* — штырь; *4* — электрообмотка; *5* — сосуд-приемник; *6* и *7* — термометры.

Для закрывания выходного сечения камеры имеется металлический штырь с конусным концом, плотно притертым к выходному отверстию рабочей камеры.

Для создания и поддержания в вискозиметре необходимой температуры последний снабжен электрической обогревательной обмоткой (нихромовой), находящейся на поверхности корпуса. Обмотка рассчитана на сеть переменного тока 220/120 *в* и разогрев до 150° С.

Сосуд-приемник представляет собой металлический сосуд наружным диаметром 34,2; внутренним — 32,2; высотой 69,5 *мм*, с риской, находящейся на незначительной глубине, удобной для наблюдения за высотой уровня шликера при проведении определения вязкости. Объем сосуда-приемника до риски равен 48 *см*³.

Вискозиметр снабжен двумя термометрами. Один термометр вспомогательный, с помощью него определяется температура в водяной бане. Основным термометром определяется температура в рабочей камере прибора.

Перед началом работы рабочая камера прибора и сосуд-приемник тщательно очищаются. Кожух заливается водой, вставляется вспомогательный термометр и включается

электрообогрев. Вода нагревается до 70° С. Одновременно с этим отдельно в сосуде (металлическом или фарфоровом) подготовляется шликер. Подготовка шликера заключается в нагревании его также до 70° С при постоянном помешивании. Разогретый шликер заливается в рабочую камеру точно до метки и выдерживается при постоянной температуре 2—3 мин.

После выдержки вынимается штырь, закрывающий выходное сечение, одновременно включается секундомер. Как только сосуд-приемник заполняется до метки, секундомер выключается.

Для получения достаточно точных данных вязкость каждого шликера определяется трижды (каждый раз с полной очисткой рабочей камеры и сосуда-приемника), а затем берется среднее арифметическое из трех замеров.

За величину, условно характеризующую вязкость шликера, принимается полученное среднее значение времени истечения шликера (в секундах), необходимое для заполнения сосуда объемом 48 $см^3$.

2. Скорость затвердевания. Помимо вязкости на способность шликера заполнять форму большое влияние оказывает скорость затвердевания шликера (скорость кристаллизации). Особенно важное значение имеет скорость затвердевания при осуществлении процесса непрерывного литья и при отливке высоких и тонкостенных деталей. При охлаждении шликера он по мере понижения температуры становится все более вязким, пока не приобретает свойств твердого тела.

Процесс отвердевания литейного шликера может протекать в зависимости от целого ряда факторов с различной скоростью.

По аналогии с технологией стекла медленно отвердевающие литейные шликеры принято называть «длинными», а быстротвердеющие «короткими». Чем «короче» литейный шликер, тем труднее обеспечить полноценное заполнение литейной формы (особенно при тонкостенных изделиях сложной конфигурации).

Скорость затвердевания шликера зависит в первую очередь от свойств технологической связки и ее количественного содержания в шликере, свойств минерального порошка, входящего в шликер, а также от скорости охлаждения шликера.

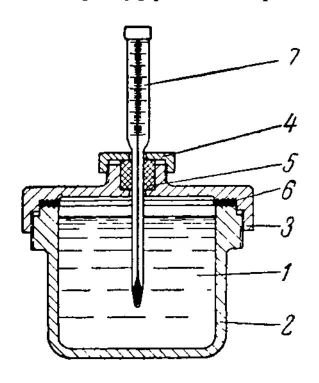
В технологии стекла (поведение которого при охлаждении аналогично поведению литейного шликера) под ско-

ростью затвердевания понимается изменение вязкости по времени.

Под скоростью затвердевания литейного шликера условно принято считать время, необходимое для полного отвердевания определенного объема шликера, нагретого до температуры 95° С и охлажденного при определенных постоянных условиях до температуры его застывания.

Для определения температуры застывания литейных шликеров рекомендуется метод Жукова, принятый в технике для определения температуры застывания парафинов.

Как известно, расплавленные тела понижают свою температуру до предела, соответствующего температуре застывания, после чего температура некоторое время (период кристаллизации) остается постоянной, а затем вновь понижается.



Фиг. 16. Приспособление для определения скорости затвердевания.

1 — исследуемый шликер; *2* — рабочая камера; *3* — крышка рабочей камеры; *4* — верхняя крышка; *5* и *6* — резиновые прокладки; *7* — термометр.

На этом принципе построен метод Жукова для определения температуры застывания парафинов.

Сущность метода заключается в том, что через определенные промежутки времени наблюдается температура расплавленного и охлаждающегося парафина. За температуру застывания принимается та температура, которая некоторое время оставалась постоянной, или наивысшая температура, после перелома кривой. Этот метод был принят в основу методики определения температуры застывания и скорости затвердевания горячих литейных шликеров. Для осуществления этого метода применяется приспособление (фиг. 16), на крышке которого закрепляется термометр. Для более плотного закрепления термометра под верхней крышкой проложена резиновая прокладка. Через крышку термометр проходит в середину рабочей камеры и исследуемый шликер.

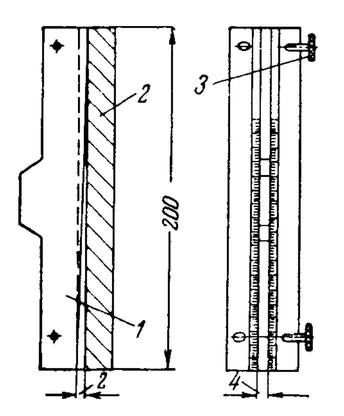
Объем рабочей камеры приспособления равен 19,5 *см*^{3}.

Определение скорости затвердевания производится следующим образом.

Литейный шликер нагревается до температуры 90° С и заливается в рабочую камеру приспособления. На рабочую

камеру навинчивается крышка с термометром. Для сбеспечения более плотного примыкания крышки к рабочей камере между ними прокладывается резиновая прокладка. Резиновая прокладка предохраняет также рабочую камеру от попадания в нее во время работы воды.

Подготовленное приспособление опускается в кипящую воду (+100° С) таким образом, чтобы со всех сторон вокруг прибора была одинаковая толщина водных слоев. В водяной бане температура исследуемого шликера поднимается до 98° С. После достижения необходимой температуры приспособление вынимается из горячей водяной бани и погружается в холодную водяную баню с температурой 20° С. Объем воды в холодной водяной бане равен 500 $см^3$. Температура исследуемого шликера в холодной водяной бане быстро падает.



Фиг. 17. Приспособление для определения литейной способности шликера.

1 — вкладыш из плексиглаca; 2 — стальной корпус; 3 — штифты стальные.

Как только температура шликера достигает 90° С, включают секундомер и начинают производить замеры через каждые 5 сек. до 30—40° С, т. е. до полного отвердевания шликера (связки). Затем шликер извлекается из рабочей камеры, и приспособление подготовляется к проведению следующих экспериментов. На основе полученных точек строится кривая, ровная площадка или точка перелома которой показывает, в каком температурном интервале происходит отвердевание массы и за какое время отвердевает исследуемый литейный шликер. Эта величина (время, необходимое для отвердевания литейного шликера) принята за характеристику скорости затвердевания литейного шликера.

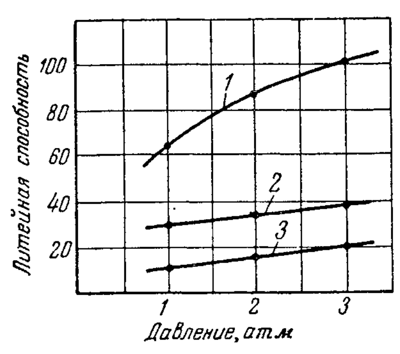
3. Литейная способность. Под литейной способностью понимается способность шликера заполнять форму, полностью воспроизводя ее конфигурацию.

Литейная способность является комплексным показателем вязкости и скорости затвердевания литейного шликера. Для определения литейной способности применяется специальное приспособление, общий вид которого приведен на фиг. 17.

Определение литейной способности с помощью этого приспособления основано на охлаждении шликера при заполнении тонкого канала в приспособлении — на аппарате для литья под давлением. По высоте заполнения канала шликером можно судить о литейной способности шликера.

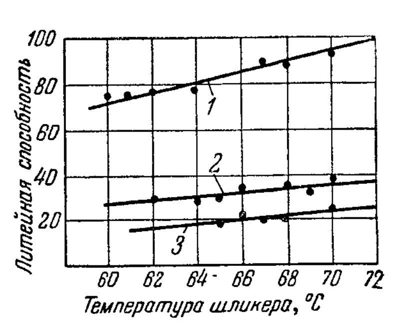
Высота заполнения канала шликером отсчитывается по шкале, имеющейся на приспособлении, или измеряется штангенциркулем.

Чем меньше вязкость и скорость затвердевания шликера, тем выше его литейная способность.



Фиг. 18. Зависимость литейной способности шликера от давления при постоянной температуре (68°).

1 — клиноэнстатитовый материал; 2 — рутиловый материал; 3 — муллитовый материал.



Фиг. 19. Зависимость литейной способности шликера от температуры при постоянном давлении (2 *ат*).

1 — клиноэнстатитовый материал; 2 — рутиловый материал; 3 — муллитовый материал.

Показатели литейной способности шликера существенно изменяются в зависимости от давления при литье, температуры шликера и температуры формы.

На фиг. 18 и 19 приведены экспериментально выявленные зависимости литейной способности от давления и температуры для шликеров из клиноэнстатитового, муллитового и рутилового материалов при постоянной температуре формы, равной 20°.

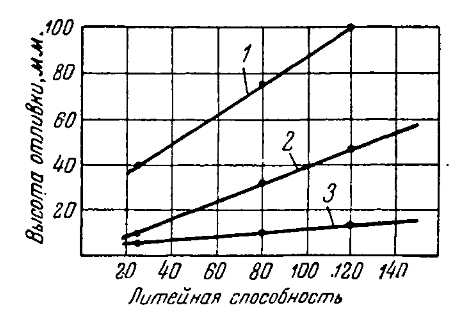
Как видно из графиков, показатели литейной способности возрастают при повышении давления и температуры шликера. В качестве критерия качества шликера литейную способность принято определять (для сравнения) при постоянных режимах:

давление	2 *ат*
температура шликера	65°
температура формы	20°

Зная литейную способность шликера (при данном режиме), можно судить о его пригодности для отливки определенного изделия. На фиг. 20 приведены опытные кривые допустимой высоты H отливки при разных толщинах стенки в зависимости от показателя литейной способности.

Если литейная способность шликера, используемого для отливки детали, удовлетворяет требованиям приведенного графика, производят отливку; если ниже необходимой, производят корректировку режима литья, в первую очередь за счет повышения давления, а затем путем повышения температуры шликера.

Следует отметить, что данные необходимой литейной способности приведены на фиг. 20 с запасом, обеспечивающим гарантированное заполнение формы.



Фиг. 20. Зависимость допустимой высоты отливки от показателя литейной способности шликера.

1—для толщины стенки отливки 3 *мм*; 2—для толщины стенки отливки 2 *мм*; 3 — для толщины стенки отливки 1 *мм*.

4. Усадка при охлаждении. Термин «усадка» известен и широко применяется в технологии горячего литья изделий (из металлов, сплавов, пластических масс и т. п.).

Явление усадки имеет большое практическое значение с точки зрения выбора конструкции форм и режимов литья, так как усадка при горячем литье вызывает изменение размеров отливки, образование раковин и рыхлот, внутренних напряжений и других дефектов.

Таким образом, понятие «усадка» является весьма важным вопросом в технологии горячего литья.

Физический смысл явления усадки заключается в том, что при изменении температуры вещества происходит изменение его объема за счет термического расширения при неизменном агрегатном состоянии (твердое, жидкое) и при переходе вещества из одного агрегатного состояния в другое. Как правило (за исключением воды, висмута и некоторых других), при повышении температуры объем вещества увеличивается, а при понижении уменьшается — «усаживается». Отсюда и термин «усадка».

Следовательно, под усадкой в широком смысле слова следует понимать сумму объемных изменений вещества при его охлаждении от исходной до заданной конечной температуры (обычно до комнатной температуры).

В общем случае, когда вещество, нагретое до температуры несколько выше температуры плавления, охлаждено до температуры ниже температуры отвердевания (кристаллизации), изменение его объема (усадка) можно разбить на три этапа:

1. Уменьшение объема в жидком состоянии при охлаждении от температуры нагрева до температуры начала отвердевания (кристаллизации).

2. Уменьшение объема при изменении агрегатного состояния, в интервале температур, при которых происходит переход в твердое состояние (кристаллизация).

3. Уменьшение объема в твердом состоянии при охлаждении до заданной конечной температуры.

Суммарное изменение объема во всех трех этапах является полной усадкой вещества при охлаждении.

Все перечисленные этапы объемных изменений вещества зависят от ряда факторов, обусловливают определенные внешние проявления усадки и находятся в тесной взаимосвязи и зависимости.

Изменения объема зависят главным образом на первом этапе от коэффициента термического расширения вещества в жидком состоянии при данной температуре, на втором этапе — от природы вещества, на третьем этапе — от коэффициента термического расширения вещества в твердом состоянии при данной температуре.

Основными проявлениями объемных изменений вещества (усадки) при горячем литье являются:

1. Изменение размеров отливки по сравнению с размерами формы — наружная усадка.

2. Образование раковин и рыхлот в теле отливки — внутренняя усадка.

Сумма наружной и внутренней усадки не является величиной полной усадки (т. е. всех объемных изменений), как это часто рассматривается; для определения полной усадки необходимо учитывать величину компенсированной усадки, под которой понимают ту часть объемных изменений (усадки), которая не дает внешних проявлений и, следовательно, остается скрытой. Компенсация усадочных явлений как прием улучшения качества известен и широко применяется

при горячем литье, однако при определении полных объемных изменений вещества (полной усадки), как правило, не учитывается, хотя имеет большое значение.

Величина внутренней усадки существенно изменяется в зависимости от степени компенсации объемных изменений, происходящих на первом и втором этапах. Следовательно, величина внутренней усадки — величина не постоянная, зависящая от условий ведения процесса литья (например, литье в кокиль, литье под давлением) и объективно не характеризующая происходящих изменений объема.

Такой объективной, постояной величиной является сумма величины внутренней и компенсированной усадки. Пользуясь этой величиной, представляется возможным на практике путем определения внутренней усадки судить о рациональности выбранной технологии литья по отношению величины внутренней усадки к компенсированной. Изменение отношения в сторону увеличения свидетельствует о неправильном выборе технологии литья.

Полная усадка ΔV вещества определяется суммой внутренней $\Delta V_в$, наружной $\Delta V_н$ и компенсированной $\Delta V_к$ усадки:

$$\Delta V = \Delta V_н + \Delta V_в + \Delta V_к.$$

Внутренняя усадка (раковины, рыхлоты) является результатом первых двух этапов объемных изменений.

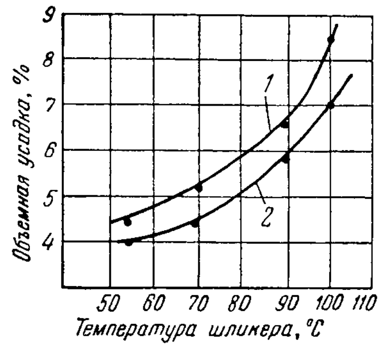
Так как изменения объема в этих этапах протекают в жидком состоянии и при переходе вещества из жидкого в твердое агрегатное состояние, то эти изменения объема могут компенсироваться постоянным притоком расплава. В идеальном случае внутренняя усадка будет равна нулю, а все объемные изменения, протекающие в эти этапы, будут компенсированы (и отображены значением $\Delta V_к$) и частично проявятся в значении наружной усадки.

Изменения объема, протекающие на третьем этапе, обусловливают в основном (частично играет роль также второй этап) наружную усадку и никакими способами компенсированы быть не могут. Величина этих объемных изменений может только колебаться в зависимости от скорости охлаждения и связанного с этим изменения структуры.

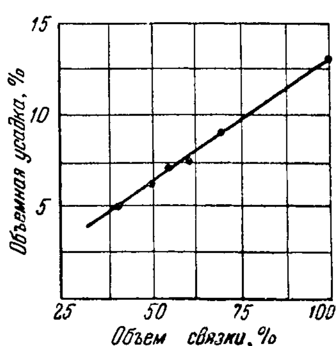
Объемная усадка при охлаждении литейных шликеров зависит от коэффициента термического расширения минеральной части и объемных изменений связки, происходящих при ее охлаждении. Коэффициент термического расширения минерального порошка в интервале температур 25—110° составляет от $\alpha = 2 \cdot 10^{-6}$ до $9 \cdot 10^{-6}$, а парафина $\sim 1 \cdot 10^{-3}$.

По литературным данным, увеличение объема парафина при плавлении составляет 10—15%, экспериментальное определение объемной усадки связки, состоящей из 95% парафина и 5% олеиновой кислоты, показало, что усадка составляет в интервале температур 55—110° от 6,95 до 13,1%.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что объемная усадка при охлаждении литейного шликера зависит, в основном, от объемных изменений технологической связки. Проведенные автором исследования подтвердили это предположение.



Фиг. 21. Зависимость объемной усадки от температуры шликера.
1 — корундовый материал; 2 — муллитовый материал.



Фиг. 22. Зависимость объемной усадки от объемного процента связки в шликере.

Определение объемной усадки производилось по простейшей методике.

Шликер, разогретый до заданной температуры, заливался в металлическую форму ∅ 50 *мм*, высотой 107 *мм* и охлаждался (путем заливки водой вокруг формы). Объемная усадка определялась по формуле

$$\Delta V = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \cdot 100\%,$$

где ΔV — объемная усадка, %;

V_1 — объем формы (залитого шликера), *см*³;

V_2 — объем отливки при температуре 20° С, *см*³.

По этой методике объемная усадка определялась у чистой связки и шликеров из разных материалов в зависимости от начальной температуры шликера.

Полученные результаты сведены в табл. 3 и представлены графиком на фиг. 21 и 22.

Таблица 3

Наименование материала	Объемный процент связки	Объемная усадка при температуре, °С			
		55	70	90	100
Муллит	54,2	4,47	5,30	6,55	8,48
Клиноэнстатит	52,5	4,30	5,25	6,37	7,65
Корунд (минутник) . .	49,5	3,99	4,40	5,81	6,95
Корунд (№ 325)	42,3	3,08	3,70	5,00	5,65
Рутил	40,7	3,32	4,26	4,95	5,41
Чистая связка	100	6,95	7,66	13,10	—

Как видно из приведенных данных, повышение температуры нагрева шликера и связки приводит к увеличению объемных усадок при охлаждении. Обобщение всех полученных данных (фиг. 22) показывает, что объемные усадки растут прямо пропорционально увеличению объемного количества связки в шликере.

Полученные данные хотя и характеризуют основные закономерности изменения объемной усадки в зависимости от количества связки в шликере и температуры нагрева, однако не являются достаточно точными для суждения об абсолютных величинах объемной усадки при охлаждении вследствие ряда погрешностей примененной методики измерения усадки, а именно:

а) при определении объема жидкого (расплавленного) шликера имеют место большие погрешности, так как залить цилиндр точно до краев практически не удается;

б) взвешивание производится на технических весах и, следовательно, точность измерений невысока;

в) объемная усадка не целиком сосредоточивается в открытой усадочной раковине; частично в теле отливки имеются мелкие раковины и рыхлоты, что искажает (уменьшает) истинное значение полной усадки.

Известные существующие приобры и методы для определения величины усадки также не дают возможности точно измерять полную усадку отливки при охлаждении. В связи с этим была разработана методика определения полной усадки по объемным весам шликера в жидком и твердом состоянии.

При применении этой методики объемная усадка должна подсчитываться по следующей формуле:

$$\Delta V = \frac{P_{V2} - P_{V1}}{P_{V2}} \cdot 100\%,$$

где ΔV — полная объемная усадка, %;

P_{V1} — объемный вес вещества в жидком состоянии при данной температуре;

P_{V2} — объемный вес того же вещества в твердом состоянии при комнатной температуре.

Определение величин P_{V1} и P_{V2} не представляет особых затруднений (производится с помощью пикнометров на аналитических весах), а полученный результат является объективным показателем, характеризующим достаточно точно полную усадку данного вещества.

Зная полную усадку и определив любым из известных методов величины внутренней и наружной усадки, можно по разности найти величину компенсированной усадки $\Delta V_к = \Delta V - \Delta V_н - \Delta V_в$. Знание этой величины является весьма важным для более глубокого изучения процесса горячего литья и сознательного подхода к практической деятельности при регулировании режимов и выборе основных параметров конструкции кокилей.

5. Плотность упаковки минеральных частиц. Плотность упаковки минеральных частиц в литейном шликере является одним из основных показателей свойств шликера, так как обусловливает его поведение (полуфабриката) в обжиге.

Плотность упаковки характеризуется коэффициентом упаковки, который определяется по формуле

$$K_{уп} = \frac{P_V(100 - x)}{\gamma_м \cdot 100},$$

где P_V — объемный вес шликера;

x — количество связки в шликере, % по весу;

$\gamma_м$ — удельный вес минеральной части (порошка).

Для определения коэффициента упаковки необходимо произвести следующее:

а) определение веса образца;

б) определение объема образца;

в) расчет объемного веса;

г) определение количества связки в шликере (по потерям при прокаливании);

д) расчет коэффициента упаковки.

Определение веса производится взвешиванием образца на аналитических весах с точностью до 0,001 *г*. Объем опре-

деляется геометрическим обмером с помощью микрометра, гидростатическим взвешиванием или пикнометрически.

Расчет объемного веса производится по формуле

$$P_V = \frac{P}{V},$$

где P — вес образца, *г*;
V — объем образца, *см*³;
P_V — объемный вес, *г/см*³.

Для определения количества связки в шликере по потерям при прокаливании взвешенный образец помещается в тигель, доведенный до постоянного веса, и прокаливается в муфельной печи при 800° в течение 2 час. Затем тигель охлаждается в эксикаторе и взвешивается на аналитических весах.

Расчет потерь при прокаливании *ППП* производится по формуле

$$ППП = \frac{P_1 - (P_3 - P_2)}{P_1} \cdot 100,$$

где P_1 — вес образца до прокаливания, *г*;
P_3 — вес образца с тиглем после прокаливания, *г*;
P_2 — вес тигля, *г*.

Расчет коэффициента упаковки производится по вышеприведенной формуле.

6. Устойчивость шликера. Под устойчивостью шликера понимается способность литейного шликера сохранять свои свойства (не расслаиваться) при длительной выдержке в нагретом состоянии; обычно литейные шликеры при длительной выдержке в нагретом состоянии склонны в той или иной мере к расслаиванию: на дно сосуда оседает уплотненная часть шликера, а на поверхности отсекается чистая связка.

Определение устойчивости основано на измерении величины этого расслоения при определенных условиях, что служит относительным критерием качества шликера.

Определение производится следующим образом.

В стеклянный мерный цилиндр емкостью 10 *см*³ (цена деления 0,1 *см*³) наливается 10 *см*³ исследуемого шликера, предварительно разогретого до 70°. Цилиндр со шликером помещается в сушильный шкаф при $t = 100°$ и выдерживается в нем в течение 20 час. Через 5 и 20 час. определяется визуально по делениям цилиндра количество отде-

лившейся связки. Величины объема отделившейся связки через 5 и 20 час. являются относительными показателями устойчивости литейного шликера.

7. Механическая прочность в твердом состоянии. Механическая прочность шликера в твердом состоянии предопределяет механическую прочность полуфабриката (отливки). Это является весьма важным с точки зрения транспортабельности полуфабриката, удобства обращения с ним на последующих операциях, уменьшения количества дефектов (сколы и т. п.) и т. д.

Определение механической прочности литейного шликера в твердом состоянии производится путем отливки стандартных образцов в виде стержней диаметром 10—12 *мм*, длиной 65—75 *мм* и испытания их на приборе Михаэлиса с соотношением плеч 1 : 10.

Перед испытанием образцы измеряются с точностью до 0,01 *мм* в центре образца и устанавливаются на две стальные призмы треугольного сечения, которые расположены на расстоянии друг от друга $50 \pm 0{,}1$ *мм*. Нагрузка прикладывается посредине с помощью третьей призмы под прямым углом к образцу. Прилагаемая к образцу нагрузка увеличивается постепенно путем всыпания в ведро дроби вплоть до момента разрушения образца.

Временное сопротивление изгибу вычисляется по формуле

$$\sigma_{изг} = \frac{M_{изг}}{W},$$

где $M_{изг}$ — изгибающий момент, *г/см*;

$$M_{изг} = \frac{10P \cdot l}{4};$$

P — вес дроби, *кг*;

l — расстояние между опорами, *см*;

W — момент сопротивления $\left(\text{для круглого сечения } W = \frac{\pi d^3}{32}\right)$.

3. МЕТОДЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ ШЛИКЕРОВ

Как выше уже указывалось, способ образования систем (литейных шликеров), обладающих необходимыми литейными и другими свойствами, основан на использовании

явления адсорбции поверхностно-активных веществ (олеиновая кислота, стеариновая кислота, воск и т. п.) на поверхности минеральных частиц порошка и применении горячего смешивания порошка со связкой.

Осуществление этого способа может производиться по различным технологическим схемам. В свою очередь схемы приготовления литейного шликера различаются в зависимости от методики подготовки порошка (диспергирования материала), методики смешивания порошка со связкой, методики вакуумирования шликера.

В настоящее время разработан и изучен ряд различных вариантов методики подготовки порошка, методики смешивания и вакуумирования:

Методика подготовки порошка имеет пять основных вариантов.

Отличие этих вариантов друг от друга по существу заключается в создании различных условий для адсорбции ПАВ на поверхности частиц порошка.

Изменение условий достигается различной методикой диспергирования материала:

в I варианте — мокрый помол (в водной среде),

во II варианте — сухой помол (в воздушной среде),

в III варианте — сухой помол (в воздушной среде в присутствии ПАВ),

в IV варианте — горячий помол (в расплавленной связке с ПАВ),

в V варианте — комбинирование предварительного сухого помола с ПАВ и горячего помола в расплавленной связке.

При использовании первого варианта в процессе диспергирования на поверхности свежего скола материала адсорбируются молекулы воды (окружающей среды). В дальнейшем путем нагревания (сушки) порошка молекулы воды частично удаляются, но часть молекул воды остается адсорбированной на поверхности частиц порошка. Удалить полностью адсорбированную воду, как показал опыт, удается только путем длительного прокаливания порошка при высокой температуре (700—800°). Следовательно, при смешивании порошка, полученного диспергированием твердого тела в воде, со связкой поверхностно-активные вещества будут действовать на границе раздела минерал — вода и частично минерал — воздух. Во втором варианте на поверхности порошка адсорбируются молекулы газов из воздуха и лишь частично молекулы воды; следовательно,

адсорбция ПАВ при смешивании такого порошка со связкой будет происходить на границе раздела минерал — воздух и частично минерал — вода.

При использовании третьего варианта (сухой помол с ПАВ) в процессе диспергирования на поверхности свежего скола материала адсорбируются молекулы воздуха, а затем на границе раздела минерал — воздух поверхностно-активные вещества. Возможно, что частично адсорбция ПАВ происходит также непосредственно на поверхности свежего скола (в случае наличия местного скопления ПАВ).

При использовании четвертого варианта в процессе диспергирования на поверхности свежего скола адсорбируются молекулы парафина, а затем на границе раздела минерал — парафин или непосредственно на поверхности свежего скола происходит адсорбция ПАВ.

Пятый вариант является сочетанием третьего и четвертого случаев.

Так как действие одного и того же ПАВ на границах раздела различных фаз (минерал — вода, минерал — воздух, минерал — парафин) неодинаково, а применение вышеперечисленных методов дает в этом смысле различные результаты, естественно, что оптимальным методом является такой, который обеспечивает наилучшие условия для адсорбции ПАВ. Как показал опыт, наилучшие результаты обеспечиваются при применении III, IV, V вариантов (для образования шликера требуется минимальное количество связки).

Одновременно при использовании V варианта обеспечиваются наибольшая простота технологического процесса и высокая производительность.

Повышенная производительность при диспергировании с ПАВ (как в воздухе, так и в связке) может быть объяснена «расклинивающим» действием ПАВ, ускоряющим процесс измельчения.

Методика смешивания порошка со связкой подразделяется в зависимости от температурного режима, применяемого оборудования и порядка смешивания на семь основных вариантов:

I. Смешивание с предварительным разогревом порошка и связки.

II. Смешивание без предварительного разогревания порошка.

III. Ручное смешивание.

IV. Смешивание пропеллерной мешалкой.

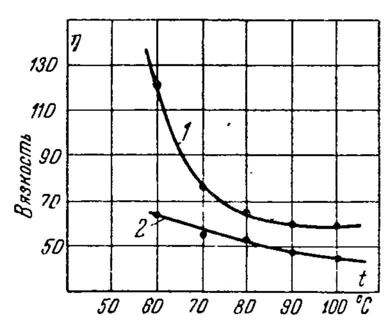
V. Смешивание в мельнице горячего смешивания (МГС).

VI. Фракционное или непрерывное введение порошка в связку.

VII. Единовременное введение полной дозировки порошка в связку.

Смешивание с предварительным разогревом порошка и связки применяется при использовании порошков, полученных в результате мокрого или сухого помола (I и II варианты методики диспергирования).

Подогрев порошка может производиться от 60 до 300°. Более низкая температура нежелательна, так как температура плавления связки 50°, подогрев выше 300° недопустим во избежание воспламенения связки. Подогрев связки производится от 60 до 100° (при более высоких температурах связка начинает интенсивно испаряться).



Фиг. 23. Влияние начальной температуры связки на вязкость шликера.

1 — при температуре порошка 60°; 2 — то же 150°.

Исследование влияния температурного режима смешивания на свойства шликера показало, что повышение начальных (перед смешиванием) температур порошка и связки приводит к некоторому снижению вязкости шликера при всех прочих равных условиях. Выявленная зависимость приведена на фиг. 23. Соответственно влияет температура системы, которая создается как производная величина начальных температур порошка и связки. Однако повышение температуры порошка выше 150° и связки выше 100° является нерациональным вследствие начинающегося интенсивного испарения связки. В связи с этим указанные температуры являются предельно допустимыми. Разогрев порошка перед смешиванием может применяться только в случаях использования сухих порошков или после мокрого помола, так как при наличии на поверхности порошка пленки ПАВ нагревать порошок не рекомендуется во избежание испарения ПАВ.

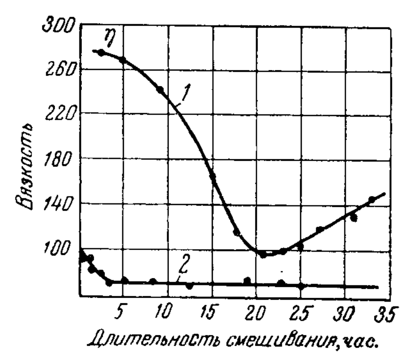
В этих случаях применяется II вариант методики смешивания: связка разогревается до температуры 80—100°,

а затем в нее вводится порошок, имеющий комнатную температуру (20—25° С). Во избежание застывания система во время смешивания непрерывно подогревается с целью поддержания температуры в пределах 60—80° С.

Фиг. 24. Влияние способа смешивания на вязкость шликера.
1 — ручное смешивание; 2 — смешивание пропеллерной мешалкой; 3 — смешивание в МГС.

При использовании любой из приведенных схем приготовления шликера необходимой операцией является механическое смешивание, осуществляемое ручным способом и с помощью различных мешалок — пропеллерных и др. В зависимости от метода смешивания изменяется интенсивность процесса, что влечет существенное изменение свойств литейного шликера.

Общая характеристика эффективности этих методов показана на фиг. 24, дающей сравнение вязкости шликеров с одинаковым количеством связки, полученных при равной продолжительности, но при различных методах смешивания.



Фиг. 25. Влияние длительности смешивания в МГС на вязкость шликера.
1 — изменение вязкости шликера, содержащего 10% связки; 2—изменение вязкости шликера, содержащего 20% связки.

Как видно из диаграммы, наиболее эффективным является смешивание с помощью МГС и наименее эффективным — ручное смешивание. Принципиальная схема устройства МГС ясно видна из фиг. 30.

Влияние интенсивности смешивания на свойства литейного шликера наглядно видно из результатов исследования влияния продолжительности смешивания.

На фиг. 25 приведены экспериментально полученные кривые изменения вязкости шликера в зависимости от времени смешивания в МГС, показывающие, что с увеличением

времени смешивания вязкость шликера (при прочих равных условиях) уменьшается.

Уменьшение вязкости шликера имеет место до определенного предела, а затем наступает стабилизация свойств шликера.

Дальнейшее увеличение времени смешивания в связи с имеющимся наряду со смешиванием явлением дополнительного измельчения минеральных частиц, приводит к повышению вязкости шликера.

Для получения литейного шликера с оптимальными свойствами процесс смешивания ведется в течение времени, необходимого для достижения стабильной и минимальной вязкости.

В зависимости от порядка осуществления операции процесса приготовления литейного шликера, т. е. порядка смешивания порошка со связкой (непрерывное, фракционное или единовременное введение порошка в связку), свойства литейного шликера также значительно изменяются.

При единовременной загрузке всего порошка в первый момент связка адсорбируется некоторой частью минерального порошка, а часть порошка остается сухой.

В дальнейшем при перемешивании связка перераспределяется, но так как этот процесс затруднен вследствие того, что адсорбированная связка прочно удерживается на поверхности минеральных частиц, шликер получается более вязким и менее однородным, чем при постепенном введении порошка.

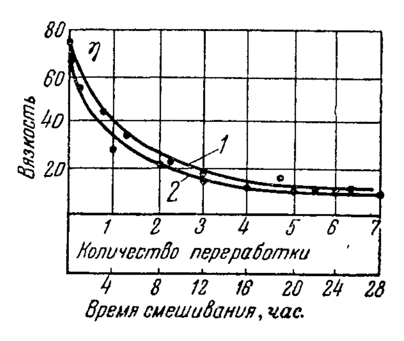
Наилучшие результаты обеспечиваются при непрерывном введении порошка в связку и одновременном интенсивном смешивании. Вполне удовлетворительные результаты дает фракционная загрузка порошка, особенно при использовании метода горячего помола в МГС.

В этом случае исходный порошок рассеивается с помощью сита-бурат или вибросита на три — четыре фракции по величине частиц. Загрузка порошка ведется, начиная с наиболее крупной (по размерам частиц) фракции. После загрузки I (крупной) фракции порошка помол ведется в течение времени, необходимого для измельчения загруженной части порошка до величины частиц, равной величине частиц следующей II фракции. Затем загружается II фракция, и помол ведется до достижения дисперсности III фракции и т. д. После загрузки последней фракции помол ведется до достижения заданной дисперсности порошка и установленной вязкости шликера.

Весовое количество загружаемых фракций должно уменьшаться от I фракции к последней. Примерное соотношение веса фракций:

I фракция 60—70%; II 20—30%; III 5—10%.

Одной из положительных особенностей литейного шликера является возможность использования всех его отходов (стружка, обрезки и т. п.), получающихся в процессе изготовления изделия, для повторного использования без каких-либо дополнительных операций. (Стружка, обрезки и т. п. расплавляются, и получающийся литейный шликер вновь готов для использования).



Фиг. 26. Влияние количества переработок шликера на его вязкость.

1 — изменение вязкости в зависимости от длительности смешивания; 2 — изменение вязкости в зависимости от числа переработок.

Это свойство шликера обычно используется в производстве, и потому представляет интерес рассмотреть, влияет ли многократная переработка шликера на его свойства.

Опыты проводились путем отливки цилиндрических заготовок диаметром 60 *мм* и длиной 150 *мм* и обточки этих заготовок до диаметра 5 *мм*. Получавшаяся при этом стружка собиралась, расплавлялась и вновь отливались такие же заготовки. Эта процедура повторялась 7 раз. После каждого цикла обработки определялась условная вязкость шликера и периодически — количество связки (определением потерь при прокаливании). Полученные результаты показывают, что переработка шликера равноценна интенсивному перемешиванию.

Изображенные на фиг. 26 кривые изменения вязкости шликера в зависимости от времени смешивания и количества переработок совершенно аналогичны. Это подтверждает справедливость вывода о необходимости доведения литейного шликера, применяемого в производстве, до стабильной вязкости, в противном случае при многократной переработке вязкость шликера будет существенно уменьшаться.

М е т о д и к а   в а к у у м и р о в а н и я   ш л и к е р а. В процессе приготовления литейного шликера на поверхности частиц, а также непосредственно в объеме шликера

остаются пузырьки воздуха, которые самопроизвольно из шликера не выходят. В зависимости от метода приготовления и вязкости шликера количество воздушных пузырьков, остающихся в шликере, изменяется. Особенно много воздушных включений у высоковязких шликеров. Наличие воздушных пузырьков снижает качество шликера (уменьшает его плотность) и существенно влияет на свойства обожженных керамических изделий, изготовленных из этого шликера. Особенно резко отражается наличие воздушных включений на пробивном напряжении и поведении изделий в поле токов высокой частоты. Наличие воздушных пузырьков в изделии приводит к значительному снижению пробивного напряжения, а при условиях работы изделия в поле токов высокой частоты высокого напряжения (например, высоковольтные высокочастотные конденсаторы) вообще недопустимо.

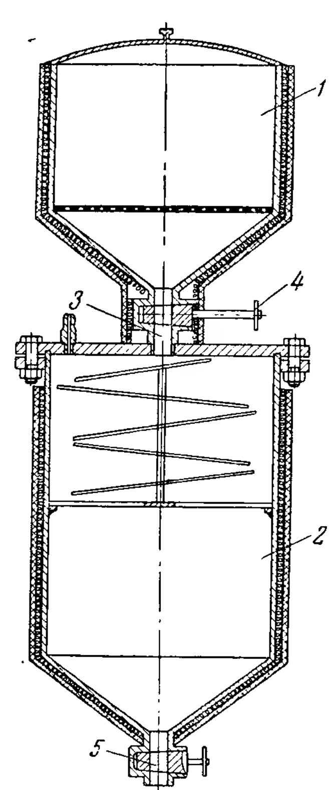
Наряду с влиянием на основные электрофизические свойства изделия наличие воздушных пузырьков приводит к ухудшению качества поверхности; так, например, при шлифовке эти пузырьки вскрываются и образуют поверхностные изъяны.

В связи с этим для получения высококачественных изделий из шликера должны быть удалены воздушные включения. Это достигается путем вакуумирования (удаления воздуха) литейного шликера с помощью вакуум-насоса и специальных устройств. Вакуумирование литейного шликера осуществляется при температуре выше температуры его плавления (70—100°).

В настоящее время разработаны и применяются пять методов вакуумирования.

1. Лабораторный метод вакуумирования чрезвычайно прост и основан на использовании обычного столика к вакуум-насосу со стеклянным колпаком. Для вакуумирования литейного шликера последний нагревают до температуры 80—100° в металлической посуде, имеющей соответствующие размеры (должна умещаться под вакуумным колпаком). Посуду со шликером устанавливают под колпак и выкачивают воздух до остаточного давления 5—10 *мм* рт. ст. Откачку воздуха продолжают в течение времени, необходимого для полного прекращения выделения воздушных пузырьков на поверхности шликера. Рекомендуется периодически (через 20—30 мин.) отключать вакуум и осторожно перемешивать шликер, а также подогревать его до температуры 80—90°.

Описанный метод вакуумирования имеет целый ряд недостатков, к числу которых в первую очередь относятся: а) недостаточно полное удаление воздушных пузырьков вследствие большой высоты столба шликера; б) малая эффективность процесса (большая продолжительность при малых объемах получаемого шликера); в) появление расслаивания шликера вследствие длительной выдержки шликера при высокой температуре в состоянии покоя.



Фиг. 27. Принципиальная схема устройства для вакуумирования литейных шликеров.

1 — верхний резервуар с обогревом; 2 — нижний резервуар с обогревом; 3 — соединительная труба; 4 — клапан. (кран); 5 — выходное отверстие.

В связи с наличием этих недостатков описанный метод для серийного производства неприемлем.

2. **Метод вакуумирования с помощью специальной установки периодического действия**, принципиальная схема которой изображена на фиг. 27, является приемлемым для мелкосерийного и серийного производства. Установка представляет собой два вертикально расположенных, один над другим, резервуара, снабженных обогревателями. Верхний резервуар соединен с нижним трубкой *3*, перекрываемой регулируемым клапаном *4*, и служит для разогрева и хранения шликера, подвергающегося вакуумированию. Нижний резервуар является вакуумным. В нем расположено под некоторым углом к оси несколько перегородок, по которым стекает шликер, вытекающий из трубки.

В дне нижнего резервуара имеется лючок с краном *5* для слива вакуумированного шликера.

Работает устройство следующим образом.

Устройство разогревается до температуры 70—90°; в верхний резервуар *1* загружается шликер; из нижнего

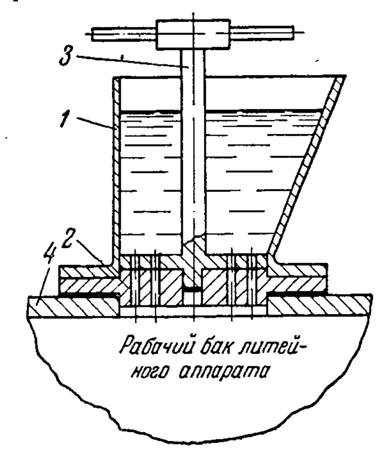
резервуара *2* через штуцер откачивается воздух. Под влиянием атмосферного давления горячий шликер из верхнего резервуара *1* перетекает по трубке *3* в нижний резервуар *2*. Скорость истечения шликера регулируется путем изменения сечения выходного отверстия с помощью крана *4*. Шликер, попадая в виде тонкой струйки в нижний резервуар, вакуумируется, причем длительность его пребывания в вакууме (в тонком слое) увеличивается за счет наклонных перегородок, по плоскостям которых он медленно стекает, накапливаясь на дне нижнего резервуара. После заполнения нижнего резервуара на 60—70% объема процесс прекращается (выключается вакуум-насос, и нижний резервуар сообщается с окружающей атмосферой), и готовый вакуумированный шликер выливается из устройства через лючок *5*.

К числу недостатков описанного метода следует отнести:

1) необходимость слива шликера из установки, при котором вакуумированный шликер в некоторой мере вновь захватывает пузырьки воздуха;

2) появление расслаивания шликера в нижнем резервуаре;

3) недостаточно высокую производительность процесса.



Фиг. 28. Схема приспособления для заливки литейного аппарата под вакуумом.

1 — воронка; *2* — основание; *3* — кран; *4* — плита рабочего бака.

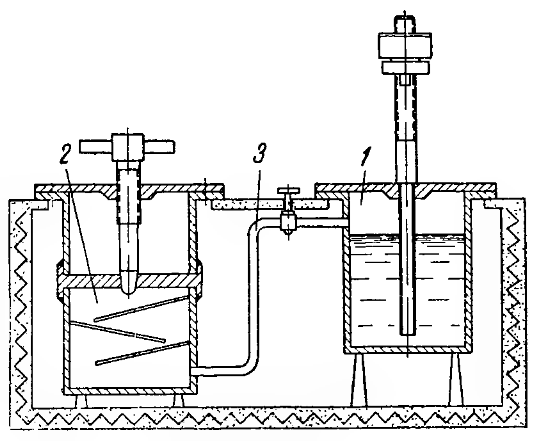
3. Метод вакуумирования шликера при заливке аппарата для литья[1] по принципу действия аналогичен предыдущему, но имеет некоторое преимущество, так как устраняет захват воздуха, имеющийся при сливе шликера. Схема устройства для вакуумирования шликера при заливке литейного аппарата приведена на фиг. 28.

Как видно из схемы, роль верхнего резервуара выполняет приспособление для заливки, а нижнего (вакуумного) — рабочий бак литейного аппарата.

[1] Устройство осуществлено по предложению слесаря М. Б. Белгородского.

Работа приспособления ясна из приведенной схемы и описания второго метода.

По сравнению со вторым методом приспособление страдает лишь одним недостатком — меньшей продолжительностью пребывания шликера в вакууме (в тонком слое) за счет отсутствия перегородок. Однако благодаря простоте устройства и в силу некоторых вышеупомянутых преимуществ в ряде случаев, когда не требуется особо тщательного вакуумирования, этому методу может быть отдано предпочтение.



Фиг. 29. Схема вакуумирования шликера в литейном аппарате.
1 — рабочий бак литейного аппарата; *2* — вакуумбак; *3* — соединительная трубка.

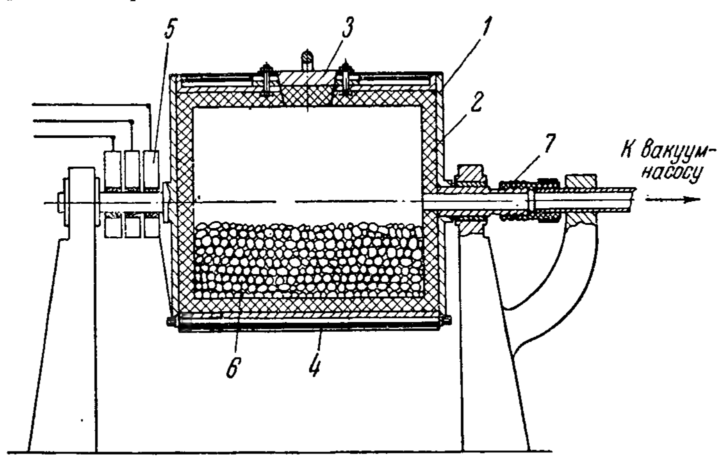
4. Метод вакуумирования в литейном аппарате, обладая преимуществами второго и третьего методов, в то же время лишен в значительной мере их недостатков и, следовательно, является более рациональным.

Принципиальная схема вакуумирования шликера в литейном аппарате (фиг. 29) представляет собой блок из устройства для вакуумирования (см. второй метод) и рабочего бака литейного аппарата.

Процесс вакуумирования осуществляется так же, как при втором методе, а слив шликера и заполнение им рабочего бака литейного аппарата производятся путем создания вакуума в рабочем баке *1* и всасыванием шликера из нижнего резервуара *2* по трубке *3*. В период переливания шликера из вакуумного резервуара в рабочий бак первый отключается от вакуум-насоса и сообщается с окружающей

атмосферой (возможен также вариант переливания шликера в рабочий бак давлением путем подключения давления сжатого воздуха в резервуар *2*).

5. **Наиболее тщательное и полноценное удаление воздушных включений из шликера обеспечивается вакуумированием в мельнице горячего смешивания.** Схема устройства приведена на фиг. 30. Обычная МГС с помощью



Фиг. 30. Схема вакуумной мельницы горячего смешивания (МГС).
1 — корпус; *2* — керамическая футеровка; *3* — загрузочный лючок; *4* — нагревательный элемент; *5* — токопроводящие кольца; *6* — мелющие тела; *7* — подвижной герметизатор.

подвижного герметизатора *7* соединена с вакуум-насосом. В процессе приготовления шликер вакуумируется. При этом устраняются все недостатки, свойственные остальным методам вакуумирования. Слив шликера в изложницы производится вакуумным всасыванием или под давлением. Загрузка шликера в литейный аппарат производится либо с помощью вакуумного всасывания (III метод), либо путем плавления вакуумированной литейной чушки непосредственно в рабочем баке литейного аппарата.

Все вышеописанные методы вакуумирования могут применяться в лабораторных и производственных условиях. Выбор метода зависит от характера производства (опытное, серийное, массовое) и требований, предъявляемых к качеству изделий. Наиболее производительным и обеспечивающим высокое качество шликера является последний метод.

Сочетание описанных различных методов подготовки по-

рошка, смешивания и вакуумирования дает возможность строить различные варианты технологического процесса приготовления литейного шликера.

В качестве примеров возможного построения технологического процесса приготовления шликера ниже приводится общее описание технологии приготовления шликера с использованием метода горячего помола (IV вариант) в связке и комбинированного метода (V вариант).

При применении IV варианта процесс приготовления литейного шликера осуществляется из дробленого (на бегунах или другим путем) материала, просеянного через сито с 16 или 144 *отв/см²* и очищенного магнитным сепаратором от примесей железа.

Основными операциями процесса являются:

1) дозировка компонентов шликера;
2) совместный горячий помол и смешивание;
3) вакуумирование;
4) контроль готового шликера.

Дозировка компонентов шликера дробленый материал — технологическая связка осуществляется взвешиванием с помощью технических весов с точностью 0,1 %.

Весовое соотношение компонентов устанавливается в зависимости от типа отливаемых изделий для каждого керамического материала в зависимости от его свойств и требований, предъявляемых к шликеру. Для тонкостенных и очень сложной формы деталей количество связки увеличивается; для толстостенных, крупногабаритных и простой формы — уменьшается.

Ниже приведена таблица весовых соотношений компонентов для некоторых материалов (табл. 4).

Во всех случаях по мере возможности следует применять шликера с наименьшим количеством связки. Усадочные коэффициенты, приведенные в таблице, являются ориентировочными и должны уточняться экспериментально в условиях производства на каждый тип шликера.

Совместный горячий помол и смешивание осуществляются следующим образом: в мельницу горячего смешивания (МГС) с футеровкой из соответствующего материала (для фарфора — фарфор, стеатита — стеатит и т. д.). загружаются мелющие тела в виде шаров, изготовленных из того же керамического материала, что и измельчаемый[1] (фарфор,

[1] Использование мелющих тел не из того же материала, что и измельчаемый, в некоторых случаях допустимо (например, кремневая галька или шары из стеатита другой марки, чем измельчаемый, для стеатита и т. п.).

Таблица 4

Наименование материала	Количество связки в шликере	Вес компонентов, %				Усадочный коэффициент (огневой)	Примечание
		Дробленый материал	Технологическая связка				
			парафин	воск пчелиный	олеиновая кислота		
Клиноэнстатитовый материал (стеатит)	8	92	7,4	0,6	—	1,06	Допустима замена воска олеиновой кислотой
	10	90	9,2	0,3	0,5	1,08	
	12	88	11,2	0,3	0,5	1,10	
	14	86	13,2	0,3	0,5	1,13	
	16	84	15,2	0,3	0,5	1,14	
	17	83	16,2	0,3	0,5	1,16	
Рутиловый материал на основе (двуокиси титана)	6	94	5,4	0,6		1,07	
	8	92	7,4	0,6		1,10	
	10	90	9,4	0,6		1,13	
Фарфор (черепок)	10	90	9,4	0,6		1,06	
	12	88	11,4	0,6		1,08	
	14	86	13,4	0,6		1,10	
	16	84	15,4	0,6		1,12	

стеатит и т. д.) в количестве, по весу в 1,5 раза большем, чем измельчаемый материал (по мере износа, истирания количество мелющих тел должно пополняться). МГС разогревается до 100°, а затем в барабан загружаются дробленый материал и компоненты связки в соответствующем количественном соотношении (см. табл. 4). Загрузка производится всей дозы сразу. После загрузки люк барабана герметически закрывается и включается вращение мельницы, в результате которого осуществляются помол с одновременным смешиванием и образование литейного шликера.

Длительность помола в МГС зависит от рода измельчаемого материала, размеров МГС, количества и состава связки, качества и размеров мелющих тел, скорости вращения мельницы и ряда других факторов.

В производственных условиях длительность приготовления шликера для каждого конкретного случая устанавливается экспериментально, путем взятия проб после первых 4 час. через каждый час и снятия их характеристик.

Время, необходимое для приготовления литейного шликера из клиноэнстатитового материала (стеатит) в МГС емкостью 60—70 *кг*, ⌀700—800 *мм* составляет:

при 10% связки 4—5 час.

при 16—17% связки 11—12 час.

По окончании процесса помола и смешивания снимается крышка люка и вместо нее на МГС устанавливается решетка и производится слив шликера в соответствующие формы (противни, лодочки и т. п.), где он охлаждается.

В целях соблюдения техники безопасности необходимо:

а) работу на МГС (загрузка, выгрузка) производить только при выключенном обогреве;

б) при снятии крышки люка предварительно ослабить гайки, дать выйти скопившимся в мельнице газам и только после этого полностью отвернуть гайки и снять крышку;

в) корпус МГС должен быть заземлен.

При применении V варианта приготовления литейного шликера процесс несколько изменяется.

Дробленый на бегунах и просеянный через сито 16 *отв/см*² порошок загружается для сухого помола в шаровую мельницу при соотношении материал — шары, равном 1 : 1.

Для создания на частицах порошка пленки ПАВ при помоле в порошок вводится по весу 0,5% ПАВ, например, олеиновой кислоты (от веса сухого порошка).

Добавка ПАВ (олеиновой кислоты) предварительно смешивается вручную с 2—3 *кг* немолотого порошка, который затем всыпается в барабан шаровой мельницы.

Помол ведется до получения порошка, дисперсность которого характеризуется остатком на сите 6 400 *отв/см*² 15—20%.

Полученный таким образом минеральный порошок одновременно с парафином загружается в МГС и подвергается окончательному помолу и смешиванию при температуре 80—90° в течение 2—3 час. (для мельницы емкостью 60—70 *кг*) до получения однородного горячего шликера сметанообразной консистенции.

По окончании процесса горячего помола-смешивания снимается крышка люка, вместо нее на мельницу устанавливается решетка и производится слив шликера в соответствующие формы — противни и т. п., в которых он охлаждается. Готовый шликер хранится после охлаждения в виде кусков или чушек.

Для повышения качества изделий шликер следует подвергать вакуумированию в расплавленном состоянии (с помощью одного из вышеописанных методов) при остаточном давлении не более 20 *мм* рт. ст.

Контроль качества полученного шликера производится следующим образом.

От каждой партии шликера берется проба 0,5—1 *кг* и производятся определения:

а) литейной способности шликера на специальном приборе (см. фиг. 16); литейная способность при температуре шликера 65°, давлении 2 *атм* и $t_{формы} = 20°$ должна быть не менее 40 *мм* (три определения);

б) потерь при прокаливании (*ППП*), которые должны соответствовать количеству введенной связки ±0,2% (два определения), проба на *ППП* берется из расплавленного шликера;

в) огневой усадки и чистоты материала (отсутствие засорки) по огневой пробе на трубке диаметром 30—40 *мм* и высотой 40—50 *мм* (два определения).

Каждой партии приготовленного шликера присваивается очередной номер и в соответствии с результатами испытаний составляется паспорт.

4. ПРИМЕНЯЕМЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ ПОРОШКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ ШЛИКЕРОВ

Литейный шликер может быть практически приготовлен из любого порошка твердого материала, однако в зависимости от свойств материала должна выбираться соответствующая методика приготовления порошка, необходимая для обеспечения возможности получения литейного шликера соответствующих свойств.

Как правило, порошок, идущий на приготовление литейного шликера, получается в результате специальной подготовки, задачей которой является превращение исходного минерального сырья в готовый керамический материал.

В общепринятой технологии образование керамического материала, состоящего из кристаллической и стекловидной фазы, происходит в процессе обжига изделия.

Процесс образования керамического материала из исходного минерального сырья связан с целым рядом физико-химических явлений (дегидратация, диссоциация, химические реакции между компонентами шихты, модификационные изменения и т. д.), в результате которых происходят изменение структуры исходного сырья и образование структуры керамического материала, а также соответствующие объемные изменения материала, являющиеся дополнительным

источником появления специфических для керамической технологии дефектов на изделиях: трещин, деформации и т. п.

Для устранения этих дефектов при изготовлении керамических изделий горячим литьем все вышеупомянутые структурные преобразования осуществляются заранее не в изделии (при его обжиге), а в порошке путем синтеза готового керамического материала — обжигом шихты до температуры спекания.

Таким образом, основной задачей процесса приготовления порошка является получение порошка, который должен состоять из частиц керамического материала определенного состава и структуры, необходимой дисперсности и гранулометрии.

Технологический процесс приготовления порошка в основном сводится к следующей общей схеме: подготовка исходного сырья — приготовление шихты — синтез материала — измельчение материала — контроль.

Для проведения указанных процессов применяются обычные для керамической технологии методы и оборудование. Необходимо отметить, что:

а) Для получения высококачественных материалов требуется повышенная точность соблюдения состава шихты.

б) При измельчении материала после синтеза (обжига) повышенная твердость его влечет увеличение намола шаров и футеровки барабана. Для устранения возможности изменения состава за счет намола, следует применять мелющие тела и футеровку из того же материала, что измельчаемый, или металлические шары с последующей химической очисткой порошка.

в) У готового порошка должна производиться не только проверка дисперсности и гранулометрии, но и контроль свойств материала на обожженных стандартных образцах.

Наиболее широкое применение в настоящее время получили непластичные керамические материалы на основе клиноэнстатита ($MgOSiO_2$), муллита ($3Al_2O_32SiO_2$), корунда(Al_2O_3), рутила (TiO_2).

Наряду с этим для различных целей применяются однокомпонентные материалы из чистых окислов металлов BeO, ZrO_2 и т. д.

Свойства некоторых типовых материалов сведены в табл. 5.

Исходное сырье, применяемое для приготовления материала, должно отвечать требованиям соответствующих ГОСТ или ТУ.

Таблица 5

Наименование материала	Диэлектрическая проницаемость	Температурный коэффициент емкости $\tau \cdot 10^{-6}$	Диэлектрические потери при нормальной температуре $tg\delta \cdot 10^{-4}$	Пробивная напряженность, *кв/мм*	Удельное объемное сопротивление, *ом·см*	Механическая прочность		Коэффициент линейного термического расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$	Температура обжига, °С	Примечание
						на изгиб, *кг/см²*	на ударный изгиб, *кг/см/см²*			
Клиноэнстатитовый (на основе $MgOSiO_2$)	6—7	+(100÷110)	4—6	25—30	10^{13}	1 400—1 600	2,5—3	6—6,5	1 140—1 200	
Муллитовый (на основе $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	6—7	+(100÷110)	25—30	20—25	10^{13}	1 200—1 300	2,5—3	2,5—3	1 440—1 460	
Рутиловый (на основе TiO_2)	90—110	—(700÷800)	2—3	10—12	10^{13}	900—1 000	—	—	1 380—1 460	
Корундовый (на основе αAl_2O_3)	7—8	—	25—30	20—25	10^{13}	2 000—2 500	4,5—6	7,5—8	1 380—1 460	

После очистки от загрязнений и сортировки исходные сырье и материалы, каждый в отдельности, отвешиваются на технических весах в количествах, необходимых по рецепту для составления шихты, и загружаются в шаровую мельницу мокрого помола.

Помол шихты осуществляется при весовом соотношении материал — вода — шары, как 1 : 1 : 1,5. Сначала загружаются грубодисперсные дробленые сырые материалы (каменистые) и производится их помол до остатка 3—5% на сите 10 000 *отв/см*², затем тонкодисперсное сырье (глины, каолин, углекислый барий и т. п.) и производится смешивание шихты в течение 4—5 час.

При выгрузке из шаровой мельницы шихта должна быть пропущена через сито 900 *отв/см*² и через электромагнитный сепаратор.

Обезвоживание шихты производится на фильтрпрессах, после чего она просушивается.

Высушенные коржи шихты до влажности 2—3% разламываются на куски, загружаются в капсели на слои подсыпки из минерального порошка и обжигаются в печи до соответствующей температуры с выдержкой при конечной температуре в течение 2—3 час.

Полученный в результате обжига спек должен быть плотным, с нулевым водопоглощением.

После обжига спекшийся материал выгружается из капселей, очищается от порошка подсыпки и подвергается дроблению под бегунами.

Дробленый материал просеивается через сито (бурат), очищается от примесей железа на электромагнитном сепараторе, после чего окончательно измельчается в шаровой мельнице.

Необходимая тонина помола материала в шаровой мельнице зависит от применяемого в дальнейшем способа приготовления литейного шликера.

При приготовлении минеральных порошков необходимо контролировать:

а) качество применяемого исходного сырья путем проверки его химического состава, влажности и внешнего осмотра;

б) условия хранения сырья во избежание смешивания различных сырьевых материалов друг с другом или загрязнения их посторонними примесями;

в) правильность завески материалов в шихту при загрузке шаровых мельниц;

г) степень помола шихты и спека по остатку на сите, а также с помощью микроскопа;

д) качество обжига спека (температурный и газовый режим и степень спекания);

е) качество материала, получаемого из минерального порошка путем изготовления и испытания образцов в количествах и сроки в соответствии с ГОСТ 5458-50 или ВТУ.

Данные проверки соблюдения технологических параметров и показатели свойств приготовленного минерального порошка записываются в паспорт, составляемый на каждую отдельную партию порошка.

В зависимости от состава и технологии приготовления порошка могут существенно изменяться его параметры, которые в свою очередь влияют на свойства литейного шликера.

Основными факторами, влияющими на параметры порошка и имеющими значение для приготовления литейного шликера, являются: состав порошка, методика помола, дисперсность и гранулометрический состав порошка, режим обжига шихты.

В зависимости от состава и свойств порошка требуются различные количество и состав связки для образования литейного шликера. В табл. 6 приведены экспериментально установленные весовые количества связки для образования литейных шликеров из некоторых материалов. При использовании порошков мокрого помола количество необходимой связки в зависимости от состава порошка колеблется в пределах от 10 до 21%, а при горячем помоле от 4,5 до 16%.

Такой широкий диапазон колебаний объясняется большой разницей в удельном весе, а также адсорбционной способности порошков.

Метод помола (среда при помоле, длительность и т. д.) влияет на дисперсность, гранулометрический состав и состояние поверхности порошка.

Состояние поверхности порошка зависит прежде всего от характера среды, в которой осуществляется помол, а также от свойств поверхности частиц порошка и условий его хранения.

Минеральные порошки обычно являются не идеально сухими, так как на их поверхности адсорбируются молекулы воды из воздуха, а в случае применения способа мокрого помола не вся вода удаляется при сушке. Опыт приготовления литейных шликеров показал, что плохо высушенные порошки образуют более вязкие шликеры или вооб-

Таблица 6

Материал порошка	Кристаллическая основа	Количество связки, необходимой для приготовления шликеров			
		из порошка мокрого помола		при горячем помоле	
		при составе связки:			
		парафин 95%, олеиновая кислота 5%	парафин 94%, пчелиный воск 6%	парафин 95%, олеиновая кислота 5%	парафин 95%, пчелиный воск 5%
Клиноэнстатит	$MgOSiO_2$	17	15	12	10
Муллит	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	21	—	—	—
Корунд	Al_2O_3	18	—	16	12
Рутил	TiO_2	15	10,3	9,5	6
Окись бериллия	BeO	21	—	—	—
Циркон	$ZrSiO_4$	15	—	—	—
Титанат бария	$BaTiO_3$	10	—	6,0	4,5
Двуокись циркония	ZrO_2	18	—	—	—
Фарфор	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	20	17	14	12

ще не удается получить литейный шликер. Также было замечено, что при попадании воды в литейный шликер последний загустевает и становится непригодным для работы.

Обычно высушенный порошок (при T = 100°) имеет влажность порядка 0,2—0,7%. Свойства литейных шликеров резко ухудшаются при наличии влаги в порошке более 0,5% (при влажности 1% и более шликер не образуется). В связи с этим с целью определения влажности различных порошков в зависимости от условий сушки был проведен ряд опытов, при которых изменялись температура и время сушки.

Результаты определения влажности (по потерям при прокаливании до 800°) порошков в зависимости от температуры и времени приведены в табл. 7.

Как видно из таблицы, при низких температурах сушки (100—300°) сравнительно легко отдают влагу только муллитовый и рутиловый порошки. Для сушки клиноэнстатитового и корундового порошков требуется более высокая температура, что в производстве нежелательно.

Полностью удалить влагу из порошка путем увеличения времени выдержки его при относительно невысоких температурах также не удается. Опыт длительной сушки

Таблица 7

Наименование материала	Исходная влажность порошка, %	Влажность порошка, %									
		при $T=100°$		при $T=200°$		при $T=300°$		при $T=500°$		при $T=700°$	
		1 час	3 часа	1 час	3 часа	1 час	3 часа	1 час	3 часа	1 час	3 часа
Муллитовый	0,22	0,19	0,17	0,13	0,17	0,10	0,13	—	0,06	—	0,001
Клиноэнстатитовый	0,64	0,56	—	0,48	0,48	0,45	0,45	—	—	—	0,001
Корундовый	0,76	—	0,55	—	0,40	—	0,44	—	0,13	—	0,004
Рутиловый	0,13	0,12	0,09	—	0,06	—	—	—	—	—	—

порошка клиноэнстатитового материала показал следующие результаты:

Таблица 8

Время выдержки порошка при 170° С, час	1	3	6	24
Влажность порошка, % . . .	0,57	0,45	0,5	0,44

Проведенными опытами установлено, что влажность порошков из различных материалов после сушки в одинаковых условиях неодинакова и зависит от различной способности порошков адсорбировать воду.

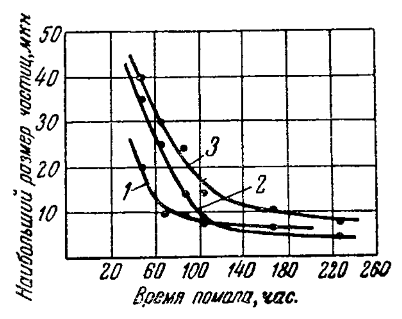
Получить почти абсолютно сухой порошок оказывается возможным только путем сушки при температурах выше 500°.

Так как образование литейного шликера возможно при наличии влажности порошка до 0,5%, практически можно ограничиваться сушкой до $T=300°$ даже таких порошков, как клиноэнстатитовый и корундовый. Вследствие того, что при помоле в водной среде на поверхности частиц неизбежно остаются адсорбированные молекулы воды, которые с трудом удаляются даже при сушке, для приготовления литейного шликера из порошка, молотого в водной среде, требуется большее количество связки, чем в случае применения порошка сухого помола или горячего помола порошка в связке. Наряду с этим наличие влаги в порошке будет изменять плотность упаковки минеральных частиц в шликере, и, следовательно, влажность порошка должна учитываться как некое дополнительное количество технологической связки.

Влияние метода помола на дисперсность и гранулометрический состав порошка рассматривается особо.

Дисперсность и гранулометрический состав порошка. Под термином «дисперсность порошка» подразумевается величина частиц, из которых состоит порошок. Чем мельче частицы, из которых состоит порошок, тем выше степень дисперсности.

Однако минеральные порошки состоят из частиц, отличающихся по величине друг от друга. При этом количество частиц того или иного размера в разных порошках может быть различным.



Фиг. 31. Влияние длительности помола на дисперсность порошка.
1 — муллитовый материал; 2 — клиноэнстатитовый материал; 3 — фарфор (черепок).

Гранулометрическим составом называется соотношение количества (обычно весового) частиц различных размеров, составляющих порошок.

В керамической технологии дисперсность порошка принято характеризовать наибольшими размерами частиц.

Практически дисперсность порошка определяется с помощью сит, например по весовому остатку порошка на сите после просеивания.

Гранулометрический состав грубодисперсных минеральных порошков, применяемых для огнеупоров и т. п., определяется с помощью ситового анализа (рассевом на ситах разного размера) и регламентируется на основе накопленных экспериментальных данных [Л. 11].

Гранулометрический состав тонкодисперсных порошков, применяемых для изготовления электрокерамики, радиокерамики и т. п., до последнего времени, как правило, не определяется, и дисперсность является основным критерием размерности порошка.

Дисперсность порошка зависит от ряда технологических факторов [Л. 15] и в первую очередь от длительности помола. На фиг. 31 приведены экспериментально полученные кривые зависимости дисперсности порошка (наибольший размер преобладающих частиц в микронах) от длительности помола в шаровой мельнице для различных керамических материалов.

Увеличение степени дисперсности порошка приводит к увеличению его удельной суммарной поверхности, что имеет большое значение с точки зрения образования литейного шликера, так как литейный шликер образуется только при условии создания на поверхности частиц слоя связки определенной толщины.

Таблица 9

№ п/п	Материал	Дисперсность порошка		Условная вязкость, сек.	Устойчивость шликера
		Величина преобладающих частиц, *мкн*	Удельная суммарная поверхность, $см^2/г$		
1	Клиноэнстатит	40	3 177	20	1,20
2	"	30	4 527	31	0,85
3	"	25	5 757	29	0,80
4	"	15	6 074	34	0,70
5	"	7	7 069	38	0,30
6	Фарфор	35	6 603	37	0,40
7	"	25	8 733	56	0,35
8	"	15	9 710	162	0,25
9	"	8	12 593	—	0,05
10	"	4	15 068	—	—

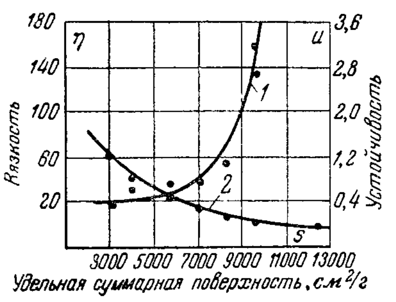
В табл. 9 приведены данные для двух различных материалов влияния дисперсности порошка на некоторые свойства литейного шликера. В таблице дисперсность порошка характеризуется двояко: величиной частиц и удельной суммарной поверхностью ($см^2/г$). Удельная суммарная поверхность определялась с помощью поверхностемера Гипроцемента.

Как видно из приведенных на фиг. 32 кривых, увеличение степени дисперсности порошка приводит к существенному увеличению вязкости шликера с сопутствующим этому улучшением показателя устойчивости шликера.

В случае сохранения постоянной вязкости шликера при различной дисперсности порошка возникает необходимость введения различного количества связки, что в свою очередь ведет к изменению плотности шликера ($K_{уп}$) и огневых усадок при обжиге образцов, изготовленных из этих шликеров. В табл. 10 и на фиг. 33 приведены экспериментальные данные зависимости $K_{уп}$ и огневой усадки от дисперсности порошка клиноэнстатитового материала, при сохранении постоянной вязкости шликера.

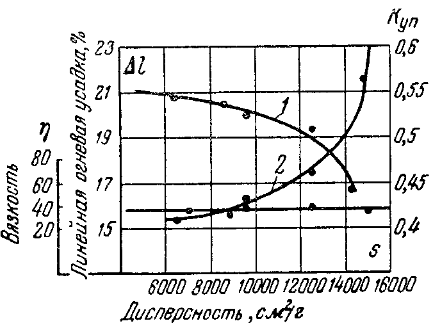
Таблица 10

№ п/п.	Дисперсность порошка		Условная вязкость	Плотность $K_{уп}$	Линейная огневая усадка Δl, %	Примечание
	Величина преобладающих частиц, *мкн*	Удельная суммарная поверхность, *см²/г*				
1	35	6 603	36,9	0,544	15,66	
2	25	8 733	37,7	0,543	15,69	
3	15	9 710	35,4	0,526	16,53	
4	8	12 593	38,4	0,516	17,60	
5	4	15 068	35,2	0,438	21,47	



Фиг. 32. Влияние дисперсности порошка на вязкость и устойчивость шликера.

1 — изменение вязкости; 2 — изменение устойчивости.



Фиг. 33. Влияние дисперсности порошка на плотность шликера $K_{уп}$ и огневые усадки при постоянной вязкости шликера.

1 — изменение $K_{уп}$; 2 — изменение линейной огневой усадки. Вязкость шликера показана прямой.

Из приведенных данных вытекает, что повышение степени дисперсности порошка при постоянной вязкости шликера приводит к необходимости увеличения количества связки, что вызывает закономерное уменьшение плотности шликера и увеличение огневых усадок.

Следует отметить, что общепринятый метод ситового определения дисперсности не полностью характеризует порошок, так как из табл. 9 видно, что порошки, имеющие одинаковую по величине преобладающих частиц дисперсность (например, 15 *мкн*), обладают различной удельной суммарной поверхностью (6 074 и 9 710 *см²/г*). Это различие может быть объяснено только различием в гранулометрических составах этих порошков.

Следовательно, пренебрегать гранулометрическим составом в случае применения тонкодисперсных порошков нельзя, так как при приготовлении литейного шликера гранулометрический состав порошка играет весьма важную роль и может существенно влиять на свойства шликера.

Действительно, при постоянной условной дисперсности порошка и различном гранулометрическом составе его порошок будет обладать различной удельной суммарной поверхностью.

Следовательно, из этих порошков, имеющих постоянную (равную) условную дисперсность, будут получаться литейные шликера с различными свойствами (вязкость, литейная способность и т. д.).

Под термином «условная дисперсность» мы подразумеваем общепринятый в керамической технологии критерий дисперсности порошка, характеризующий дисперсность по остатку на сите определенного размера. Такой термин мы вводим потому, что согласиться с тем, что при определенном остатке на сите, — допустим, на сите 10 000 *отв/см*², — дисперсность порошка является определенной и точно установленной, конечно, нельзя, так как суммарная удельная поверхность порошка, прошедшего через сито, может быть различная. Следовательно, такой общепринятый критерий дисперсности минерального порошка можно считать только условным критерием. Наличие различных удельных суммарных поверхностей у порошков, имеющих постоянную условную дисперсность, является следствием различных гранулометрических составов этих порошков.

Предыдущими исследованиями нами было установлено, что чем меньше удельная суммарная поверхность порошка, тем меньшее количество связки требуется для образования литейного шликера и тем выше плотность упаковки минеральных частиц ($K_{уп}$) в шликере.

С целью улучшения свойств литейного шликера желательным является получение минерального порошка с минимальной суммарной удельной поверхностью, уменьшить которую можно двумя путями:

1) увеличением размеров частиц, т. е. уменьшением степени условной дисперсности порошка;

2) рациональным смещением гранулометрического состава порошка.

Первый путь, применяющийся в технологии в настоящее время, является нежелательным, так как снижает технологические свойства полуфабриката (выкрашивание частиц

при обработке резанием) и несколько ухудшает свойства обожженных изделий (снижается механическая прочность).

Второй путь мало изучен, но, повидимому, имеет большие перспективы.

Для оценки возможностей второго способа как пути уменьшения удельной суммарной поверхности порошка можно воспользоваться следующим простым примером.

Допустим, мы имеем порошок, условная дисперсность которого характеризуется остатком 0,1—0,2% на сите 10 000 *отв/см*², т. е. максимальный размер зерна составляет 60 *мкн.*

Гранулометрический состав порошка включает в себя частицы с различными размерами, начиная с величины 60 *мкн* и кончая, допустим, 0,1 *мкн.*

Разобьем условно эту гамму размеров частиц на четыре группы:

I) 60 — 20 *мкн*, средний 40 *мкн*;
II) 20 — 5 *мкн*, средний 12,5 *мкн*;
III) 5 — 1 *мкн*, средний 3 *мкн*;
IV) 1 — 0,1 *мкн*. средний 0,55 *мкн*.

Определяем рассчетным путем (условно принимая форму частиц за шар) ориентировочную удельную суммарную поверхность каждой группы по формуле

$$S = \frac{6}{d\gamma_м} \quad [см^2/г],$$

где d — размер частицы (диаметр шара), *см*;
$\gamma_м$ — удельный вес материала частицы, *г/см*³.

Таблица 11

Группа	Размер частиц, *см*	Удельная суммарная поверхность, *см*²/*г*	Примечание
I	$40 \cdot 10^{-4}$	483	Для материала с $\gamma_м = 3,1$
II	$12,5 \cdot 10^{-4}$	1 545	
III	$3 \cdot 10^{-4}$	6 450	
IV	$0,55 \cdot 10^{-4}$	35 300	

Теперь возьмем для сравнения три произвольно выбранных разных гранулометрических состава порошков из этих частиц (с одинаковой условной дисперсностью) и определим их удельную суммарную поверхность.

Таблица 12

№ состава	Гранулометрический состав								Удельная суммарная поверхность порошка, $см^2/г$
	I—10 *мкн*		II—12,5 *мкн*		III—3 *мкн*		IV—0,55 *мкн*		
	фракции, %	поверхность, $см^2$	фракции, %	поверхность, $см^2$	фракции, %	поверхность, $см^2$	фракции, %	поверхность, $см^2$	
1	40	194	30	463	20	1 290	10	3 530	5 477
2	25	120	25	386	25	1 610	25	8 830	10 946
3	10	48	20	310	30	1 930	40	14 100	16 388

Из табл. 12 видно, что удельная суммарная поверхность порошка может в несколько раз увеличиваться или уменьшаться только за счет изменения его гранулометрического состава при постоянной условной дисперсности.

Рассмотрим, какие технологические факторы влияют на гранулометрический состав тонкодисперсного порошка и какое влияние в свою очередь оказывает гранулометрический состав порошка на свойства литейного шликера.

Минеральный порошок для приготовления литейного шликера обычно образуется путем грубого и тонкого помола спека исходного материала. Следовательно, гранулометрический состав порошка является результатом того или иного способа и режимов помола и будет изменяться в зависимости от изменений методики и условий помола.

В качестве основного оборудования для помола спека в порошок при приготовлении литейного шликера применяют бегуны и шаровые мельницы.

В результате помола на бегунах получается грубодисперсный порошок, гранулометрический состав которого включает в себя наряду с крупными весьма мелкие частицы. Ситовой анализ гранулометрического состава порошка клиноэнстатитового материала, полученного при обычной методике помола на бегунах, представлен в табл. 13.

При помоле в шаровых мельницах в зависимости от целого ряда факторов меняются условия помола и, следовательно, изменяется гранулометрический состав порошка.

К числу основных факторов, влияющих при помоле в шаровых мельницах на гранулометрический состав порошка, можно отнести:

1) размер мелющих тел (шаров);
2) вес мелющих тел (вес загрузки);
3) удельный вес материала мелющих тел;

Таблица 13

№ снт (количество отверстий на 1 $см^2$)	Размер частиц, *мкн*	Количество, % по весу
100	1 000—600	31,4
256	600—385	8,4
900	385—200	19,2
1 600	200—150	4,6
3 600	150—102	6,2
6 400	102—75	7,5
10 000	75—60	3,3
Выше 10 000	60 и меньше	19,4

4) диаметр шаровой мельницы;
5) число оборотов мельницы;
6) твердость футеровки;
7) твердость материала мелющих тел;
8) механическая прочность измельчаемого материала;
9) вязкость среды при помоле;
10) состав среды при помоле;
11) длительность помола (под длительностью помола имеется в виду длительность пребывания в процессе помола частицы, измельченной до заданного размера, т. е. периодичность отсева измельченных частиц).

Исследование влияния последних трех факторов показало их большое значение для регулирования гранулометрического состава порошков.

При проведении исследования были приняты следующие условия:

а) Помол осуществлялся в шаровой мельнице лабораторного типа и с помощью винтового пресса (раздавливанием).

б) При помоле в шаровой мельнице весовое соотношение мелющие тела — материал было принято равным 2 : 1. Помол осуществлялся в фарфоровом барабане емкостью 2 *л*. Внутренний диаметр барабана 130 *мм*. В качестве мелющих тел применялась кремневая галька (удельный вес материала равен 2,5) размером 30—40 *мм*; число оборотов барабана 76 об/мин.

в) При измельчении с помощью винтового пресса помол осуществлялся в стальной ступке стальным пестиком при постоянном числе ударов, равном 30 в минуту.

г) В качестве исходного материала для измельчения был принят спек клиноэнстатитового материала, который

предварительно дробился и просеивался через сита 16 и 144 *отв/см²*.

Порошок, прошедший через сито 16 *отв/см²* и оставшийся на сите 144 *отв/см²* (размер частиц 0,5—1,5 *мм*), принимался за исходный для опытов помола (остаток на сите 16 *отв/см²* и порошок, прошедший через сито 144 *отв/см²*, отбрасывались).

д) Во всех опытах помол осуществлялся до постоянной условной дисперсности (размер частиц 150 *мкн* и меньше), контролируемый остатком на сите 1 600 *отв/см²*, — 0,1—0,2% (т. е. практически помол до полного прохождения порошка через сито 1 600 *отв/см²*).

е) Определение гранулометрического состава производилось путем рассева молотого порошка на четыре фракции:

I фракция — частицы 150—75 *мкн* (прошедшие сито 1 600 *отв/см²*, остаток на сите 6 400 *отв/см²*).

II фракция — частицы 75—60 *мкн* (остаток на сите 10 000 *отв/см²*).

III фракция — частицы 60—30 *мкн* (остаток на сите 29 000 *отв/см²*).

IV фракция — частицы 30 *мкн* и меньше (прошедшие через сито 29 000 *отв/см²*).

Для определения влияния вязкости среды при помоле на гранулометрический состав опыт проводился путем помола исходного порошка в шаровой мельнице в водной среде. Для изменения вязкости среды при помоле количество воды, загружаемой в барабан, изменялось в следующих пределах:

I—25% (воды 33 *г*, порошка 100 *г*)
II—50% (воды 100 *г*, порошка 100 *г*)
III—75% (воды 300 *г*, порошка 100 *г*).

Помол осуществлялся в течение времени, необходимого и достаточного для получения порошка установленной условной дисперсности (остаток на сите 1 600 *отв/см²* 0,1—0,2%). Указанное достигалось периодической проверкой (через 15 мин.) дисперсности порошка по остатку на сите 1 600 *отв/см²*.

Определение влияния состава (характера) среды при помоле на гранулометрический состав порошка осуществлялось путем сравнения гранулометрического состава порошков, полученных в результате диспергирования в шаровой мельнице:

а) сухим помолом (среда — воздух);
б) мокрым помолом (среда — вода);

в) сухим помолом с добавкой 0,5% олеиновой кислоты (среда — воздух, олеиновая кислота).

Для определения влияния длительности помола на гранулометрический состав порошка опыт производился с применением периодического отсева измельченных до установленной дисперсности частиц порошка через каждые 5, 3 и 1 мин. помола.

Таким образом, измельченные до установленной условной дисперсности частицы порошка находились в процессе помола более или менее длительный период в зависимости от частоты отсева. Отсев производился вручную на сите 1 600 *отв/см*².

При проведении всех опытов помола наряду с контролем гранулометрического состава порошка определялась интенсивность помола (выход в граммах порошка заданной дисперности за единицу времени).

Результаты опытов сведены в табл. 14.

Анализом приведенных в таблице результатов экспериментальной работы установлено, что:

а) вязкость среды при помоле существенно влияет на гранулометрический состав порошка: с увеличением вязкости растет количество частиц мелкой фракции и уменьшается количество частиц крупной фракции;

б) длительность помола (частота отсева измельченных частиц) также существенно влияет на гранулометрический состав порошка: уменьшение длительности помола влечет увеличение количества частиц крупной фракции и уменьшение количества частиц мелкой фракции;

в) способ помола существенно влияет на производительность процесса: снижение вязкости среды и отсев измельченных частиц при помоле повышает производительность помола в 5—6 раз.

Эти данные дают основание для суждения о характере явлений, протекающих при помоле, и причинах изменения гранулометрического состава порошка в зависимости от условий помола.

Выявленное изменение гранулометрического состава порошка в зависимости от вязкости среды может быть объяснено следующим образом.

Помол частиц в шаровой мельнице осуществляется в результате работы двоякого рода: дроблением частиц в результате удара при падении мелющих тел и истиранием частиц между шарами (и частично между шарами и футеровкой), скользящими друг по другу.

Таблица 14

№ п/п.	Метод помола	Характер среды при помоле	Периодичность отсева измельченных частиц	Гранулометрический состав, % по весу				Интенсивность помола, *г/мин*
				I фракция	II фракция	III фракция	IV фракция	
				150—75 *мкн*	75—60 *мкн*	60—30 *мкн*	30 *мкн* и меньше	
1	Шаровая мельница	Вода — 25%	Без отсева	0,59	0,26	5,28	93,87	0,38
2	„ „	„ — 50%	„ „	14,1	6,5	16,1	63,3	0,65
3	„ „	„ — 75%	„ „	15,6	7,2	17,6	59,6	0,84
4	„ „	Воздух	Без отсева	29,1	6,15	22,3	44,48	0,20
5	„ „	„	С отсевом через 5 мин.	58,05	11,05	7,7	23,2	0,61
6	„ „	„	С отсевом через 3 мин.	62,6	11,0	13,8	12,6	0,57
7	„ „	„	С отсевом через 1 мин.	62,0	5,1	7,4	25,5	1,43
8	„ „	Воздух+0,5% олеиновой кислоты	Без отсева	30,0	5,92	63,7	0,37	0,25
9	„ „		С отсевом через 5 мин.	46,18	6,72	15,2	31,9	0,60
10	„ „		С отсевом через 3 мин.	55,55	12,05	28,0	4,45	0,54
11	„ „	То же	С отсевом через 1 мин.	61,4	7,33	15,67	15,6	0,72
12	Давлением пресса	Воздух	Без отсева	35,8	11,7	27,6	24,9	0,78
13	„ „	„	С отсевом через 5 мин.	42,6	7,4	12,6	37,4	1,11
14	„ „	„	С отсевом через 3 мин.	46,8	9,5	15,35	28,35	1,67
15	„ „	„	С отсевом через 1 мни.	57,5	4,86	7,64	30,0	2,33

В зависимости от вязкости среды при помоле (при прочих равных условиях) изменяется соотношение между работой дробления и истирания.

Дробление тормозится и ослабляется при повышении вязкости среды, так как уменьшается живая сила при падении шара (уменьшается скорость), одновременно растет интенсивность работы истирания.

При дроблении получаются частицы различных размеров (крупные и мелкие), а при истирании только мелкие. Увеличение вязкости среды влечет за собой увеличение работы истирания и уменьшение дробления, поэтому получают порошок с преобладанием в гранулометрическом составе мелкой фракции. Обратная картина получается при уменьшении вязкости среды.

Причина изменения гранулометрического состава при изменении длительности помола (путем отсева измельченных частиц) ясна из следующего: очевидно, что при работе шаровой мельницы измельчению подвергаются в равной мере все частицы, находящиеся в барабане (как крупные, так и мелкие), следовательно, при длительном пребывании частиц в барабане доминирует помол мелких частиц, количество которых всегда больше, чем крупных; таким образом, только в том случае, когда изымаются (отсеиваются) частицы, измельченные до установленной степени дисперсности, помолу подвергаются в основном крупные частицы. При этом повышается производительность процесса и в гранулометрическом составе преобладают частицы наибольшего размера.

На основании этого можно сказать, что для получения порошка заданной условной дисперсности с гранулометрическим составом, обеспечивающим минимальную удельную суммарную поверхность, оптимальными условиями помола являются: помол в среде минимальной вязкости при минимальном времени пребывания частицы в мельнице (т. е. с непрерывным отбором измельченных частиц).

В описанных опытах определялся гранулометрический состав порошков относительно невысокой степени условной дисперсности (150 *мкн* и ниже).

На практике весьма часто приходится применять более тонкодисперсные порошки. Поэтому представляет интерес установить, справедливы ли сделанные выводы о зависимости гранулометрического состава от рассмотренных условий помола также и для более тонкодисперсных порошков.

В табл. 15 приведены данные определения удельной

суммарной поверхности порошков с условной дисперсностью 30 *мкн* и ниже (т. е. прошедших без остатка через сито 29 000 *отв/см²*), приготовленных помолом в среде различной вязкости (25, 50 и 75% воды) и сухим помолом с отбором и без отбора измельченной фракции.

Таблица 15

№ п/п.	Способ помола	Удельная суммарная поверхность, *см²/г*
1	Мокрый помол — 25% воды . . .	4 039
2	Мокрый помол — 50% воды . . .	3 173
3	Мокрый помол — 75% воды . . .	2 834
4	Сухой помол без отсева	3 471
5	Сухой помол с отсевом через 1 мин.	2 582

Как видно из приведенных данных, с увеличением вязкости среды при помоле возрастает удельная суммарная поверхность порошка. Так как условная дисперсность порошков одинакова (30 *мкн* и ниже), увеличение удельной суммарной поверхности показывает, что гранулометрический состав порошка смещается в область преобладания мелкой фракции. Указанное находится в соответствии с ранее приведенными данными о зависимости гранулометрического состава от вязкости среды при помоле. Эти данные подтверждаются также второй частью опыта, а именно: удельная суммарная поверхность порошка, молотого с отсевом, меньше, чем при помоле без отсева. Следовательно, при отсеве измельченной фракции (т. е. уменьшении длительности помола) гранулометрический состав порошка смещается в область преобладания крупной фракции.

Таким образом, можно считать, что и в этом случае оптимальным условием помола, с точки зрения получения порошка определенной условной дисперсности при минимальной удельной суммарности поверхности, является помол в среде минимальной вязкости при непрерывном отборе измельченных частиц (т. е. минимальной длительности измельчения).

Влияние гранулометрического состава порошка на свойства литейного шликера было изучено путем приготовления литейных шликеров (с введением 12% связки) из порошков различного гранулометрического состава, полученных в результате сухого помола и помола с добавками 0,5% олеиновой кислоты.

У полученных литейных шликеров определялись: вязкость, литейная способность, устойчивость и механическая прочность в твердом состоянии.

Результаты определения свойств шликеров приведены в табл. 16.

Таблица 16

№ шликера	Гранулометрический состав		Вязкость (время истечения), сек.	Линейная способность	Устойчивость (5 час.)	Механическая прочность полуфабриката	Примечание
	Остаток на сите 10 000 *отв/см²*	Прошло через сито 10 000 *отв/см²*					
1	70	30	Не течет	8,6	0,5	32,9	Сухой помол
2	50	50	154	13,8	0,3	40,8	
3	30	70	449	8,2	0,3	41,5	
4	70	30	25	48,4	0,6	49,0	Помол с ОК
5	50	50	40	41,5	0,5	52,0	
6	30	70	Не течет	6,2	0,5	33,7	

Как видно из приведенных данных, смещение гранулометрического состава порошка в сторону преобладания тонкой фракции приводит к снижению литейной способности шликеров и увеличению вязкости.

Вязкость шликеров, приготовленных из порошков, молотых с добавкой олеиновой кислоты, меньше, чем у шликеров из порошков сухого помола.

Особо следует отметить увеличение вязкости шликера, приготовленного из порошка сухого помола с преобладанием в гранулометрическом составе крупной фракции (150—60 *мкн*). Это отклонение от общей закономерности может быть объяснено пониженной прочностью адсорбционного слоя, образующегося при смачивании сухого порошка; в результате этого вес крупной частицы оказывается достаточным для образования непосредственных точек контакта с соседними частицами, что обусловливает малую подвижность (повышенную вязкость) шликера.

Высказанное предположение подтверждается полученными показателями устойчивости шликера; как видно из табл. 16, несмотря на повышенную вязкость, шликер № 1 имеет наибольшую склонность к расслаиванию (устойчивость равна 0,5) по сравнению с 0,3 у остальных шликеров этого же ряда, имеющих меньшую вязкость.

Таким образом, описанные опыты дают основание для следующих выводов:

1. Гранулометрический состав порошка при постоянной условной дисперсности оказывает существенное влияние на свойства литейного шликера.

2. Смещение гранулометрического состава в сторону преобладания тонкой фракции (60 *мкн* и ниже) приводит к повышению вязкости и снижению литейной способности шликера. Смещение в сторону преобладания крупной фракции (150—60 *мкн*) также ухудшает свойства шликера (уменьшает его устойчивость).

3. При выборе оптимального гранулометрического состава для приготовления шликера следует стремиться к ограничению максимального размера частиц (снижая максимальные размеры до 40—50 *мкн*) и уменьшению количества очень мелкой фракции (менее 1—2 *мкн*) с целью снижения удельной суммарной поверхности порошка при повышении его условной дисперсности.

Указанное может быть достигнуто выбором соответствующих условий помола: а) уменьшением вязкости среды при помоле; б) увеличением эффективности дробления и уменьшением истирания при помоле; в) применением поверхностно-активных веществ при помоле и г) непрерывным отбором измельченных частиц в процессе помола.

Режим обжига шихты. При обжиге шихты материала изменение конечной температуры, скорости подъема температуры, времени выдержки при конечной температуре и других параметров режима обжига влечет изменение свойств получаемого материала: твердости, удельного веса, структуры и т. д.

Изменение твердости обожженного материала приводит к изменению дисперсности и гранулометрического состава порошка, получаемого в результате помола материала, а следовательно, к изменению свойств литейного шликера.

В качестве примера, подтверждающего сказанное, в табл. 17 приведены опытные данные изменения суммарной удельной поверхности порошков кордиерита и муллита, молотых при постоянных условиях, но шихты которых обжигались при различной температуре или с различной выдержкой при конечной температуре.

Соответственно изменяются и свойства литейных шликеров, приготовленных из этих порошков. Так, например, при постоянном количестве связки вязкость шликера, пригото-

Таблица 17

№ п/п.	Материал	Температура обжига шихты, °С	Время выдержки при конечной температуре, час.	Удельная суммарная поверхность порошка после помола, $см^2/г$
1	Муллит	1 470	0,5	5 065
2	Муллит	1 470	1,0	4 850
3	Муллит	1 470	2,0	4 725
4	Кордиерит	1 350	2,0	5 025
5	Кордиерит	1 380	2,0	4 000

вленного из кордиерита, обожженного при 1 350°, составляет 145, а при 1 380°—69, т. е. почти вдвое уменьшается.

В зависимости от режима обжига шихты весьма существенно изменяется удельный вес порошка.

Удельные веса минеральных порошков различного состава различаются друг от друга в весьма значительных пределах (от 2,3 до 10 $г/см^3$). Наряду с этим удельный вес порошка постоянного химического состава также сильно изменяется в зависимости от его структуры, что в свою очередь определяется технологией его приготовления и в первую очередь режимом обжига. Так, например, удельный вес порошка технической окиси алюминия (Al_2O_3) в зависимости от температуры обжига изменяется в пределах от 3,42 до 4,0; удельный вес порошка клиноэнстатитового материала от 2,7 до 3,2 и т. д.

С точки зрения приготовления литейного шликера удельный вес порошка является важной характеристикой.

а) В зависимости от удельного веса порошка при постоянном весовом количестве вводимой связки изменяется плотность упаковки частиц в шликере. Так, например, если приготовить литейный шликер с введением 10% (по весу) связки из порошков, имеющих удельные веса 3,5 и 4,0, то получим литейные шликеры: в первом случае с $K = 0{,}70$, а во втором с $K = 0{,}67$.

б) В зависимости от удельного веса исходного порошка изменяется огневая усадка изделий при прочих постоянных данных шликера, из которого изготовлено изделие. Изменение усадки связано с тем, что при обжиге изделия порошок претерпевает изменение удельного веса, а следовательно, и объема.

в) Удельный вес порошка характеризует в определенной мере его структуру и поверхностные свойства, которые определяют адсорбционную связь порошка со связкой, а следовательно, и свойства шликера.

Влияние удельного веса исходного порошка на свойства шликера видно из результатов опытов с клиноэнстатитовым материалом. Для получения исходного порошка с различным удельным весом шихта клиноэнстатитового материала обжигалась на различные температуры; полученный спек подвергался петрографическому анализу структуры и определению удельного веса, а затем спек подвергался помолу и из него приготовлялся литейный шликер постоянной условной вязкости. Критерием изменения свойств в зависимости от удельного веса порошка являлось количество связки, необходимой для образования литейного шликера.

В табл. 18 приведены результаты опытов.

Таблица 18

№ п/п.	Наименование показателей	Температура обжига шихты, °С			
		1 050	1 150	1 250	1 350
1	Петрографические определения	Энстатит	40% клиноэнстатита	80% клиноэнстатита	80% клиноэнстатита
2	Удельный вес порошка . .	2,69	3,10	3,14	3,14
3	Условная дисперсность порошка	40 *мкн* и ниже	40 *мкн* и ниже	40 *мкн* и ниже	40 *мкн* и ниже
4	Количество связки, %, введенной до получения литейного шликера постоянной условной вязкости 39 сек.	23	22	19	17

Как видно из приведенных данных, увеличение удельного веса порошка приводит к уменьшению количества связки, необходимой для образования литейного шликера. Однако это изменение количества необходимой связки нельзя отнести полностью только за счет изменения удельного веса порошка, так как одновременно изменяется структура материала, а следовательно, и его адсорбционная способность.

Таким образом, для приготовления литейного шликера следует считать наиболее целесообразным применение порошков с удельным весом, доведенным до своего крайнего предела (до максимума), т. е. порошков из частиц готового керамического материала.

Такие порошки, требуя минимального количества связки для образования литейного шликера, одновременно являют-

ся наиболее стабильными также и с точки зрения последующих технологических операций (огневые усадки минимальные и постоянные).

5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВЯЗКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ ШЛИКЕРОВ

В керамической технологии в качестве связок применяются разнообразные вещества, которые можно подразделить на две большие группы:

1. Неорганические связки (глины, цементы и т. п.).
2. Органические связки (клеи, смолы, спирты, парафины и т. п.).

Основным отличием этих групп связок друг от друга является то, что первая группа связок после исполнения своих технологических функций, как правило, входит в состав керамического материала и, следовательно, оказывает влияние на его структуру и свойства; вторая группа полностью удаляется из материала и не влияет на состав и структуру материала. Органические связки имеют определенные преимущества перед неорганическими.

Группа органических связок может быть классифицирована по принципу действия на три основных подгруппы:

1. Клеящие связки (крахмал, декстрин и т. п.).
2. Термореактивные (смолы и т. п.).
3. Термопластичные (парафины, воски и т. п.).

Наибольшее применение в керамической технологии имеют связки 1 и 3.

В технологии горячего литья для приготовления литейных шликеров применяются термопластичные связки, к которым относятся органические вещества, обладающие способностью многократно переходить из твердого состояния в жидкое и наоборот в результате нагрева и охлаждения. К такого рода веществам относятся парафины, воски, твердые жиры, пеки, некоторые смолы и т. п. Сведения, имеющиеся в литературе по вопросам применения указанных связок, весьма ограничены и по существу дают только общее представление о возможности применения некоторых из них в качестве связок при прессовании.

Для приготовления литейных шликеров применяются технологические связки, представляющие собой составы, состоящие из основы (термопластичного вещества) и добавки ПАВ (поверхностно-активного вещества).

В качестве основы этих технологических связок наиболее широко применяется парафин (а также сплавы пара-

фина с церезином и т. п.) как один из наиболее дешевых термопластичных веществ и обладающий всеми необходимыми свойствами. Парафин плавится при температуре 50—56° и при охлаждении отвердевает (кристаллизуется), образуя твердое тело кристаллического строения. Структура парафина приведена на фиг. 34 (см. вклейку). Низкая температура плавления парафина является его положительным свойством при применении в технологии горячего литья, так как обеспечивает возможность осуществления процесса литья при относительно низких (55—80°) температурах, безопасность работы и упрощение конструкций устройств для литья.

При кристаллизации (охлаждении) парафин дает объемную усадку 7÷13%, что в свою очередь приводит к наличию объемных усадок у литейных шликеров.

В качестве поверхностно-активных веществ в состав технологических связок вводятся органические вещества — жирные кислоты (олеиновая, стеариновая, пальмитиновая и т. п.), животные жиры, пчелиный воск, растительные масла и т. п., которые выбираются в зависимости от природы и свойств поверхности порошка и основы связки. Наиболее приемлемыми и универсальными ПАВ для приготовления литейных шликеров из различных минеральных порошков являются олеиновая кислота, стеариновая кислота и пчелиный воск.

ПАВ вводятся в состав связок с целью образования на поверхности частиц порошка мономолекулярного адсорбционного слоя (возможно также полимолекулярного), обеспечивающего снижение свободной поверхностной энергии у частиц порошка, и уменьшения количества парафина, необходимого для образования подвижной (жидкой) системы — литейного шликера.

В соответствии с этим количество вводимой добавки ПАВ зависит от удельной суммарной поверхности порошка, т. е. от его дисперсности и гранулометрического состава и может быть ориентировочно подсчитано из расчета на образование моно- или полимолекулярного слоя по следующей формуле:

весовой % ПАВ $$\Delta p = \frac{Sl\gamma_c \cdot 10^{-6}}{1 + Sl\gamma_c}\ \%,$$

где S — удельная суммарная поверхность порошка, *см²/г*;

l — длина молекулы ПАВ, Å;

γ_c — удельный вес ПАВ.

Эти расчеты являются приближенными, так как основаны на предположении, что плотность адсорбированной пленки равна плотности вещества в объеме и что площадь, занимаемая молекулами ПАВ, равна площади поверхности частиц порошка.

Для практических целей эти расчеты, как показал опыт, являются приемлемыми.

В состав технологической связки ПАВ вводится непосредственным сплавлением с основой (например с парафином) или предварительным смешиванием с минеральным порошком, из которого приготовляется литейный шликер, в зависимости от способов приготовления литейного шликера.

Свойства литейных шликеров весьма существенно изменяются в зависимости от состава и количества технологической связки. Состав связки должен выбираться с учетом свойств минерального порошка, из которого образуется литейный шликер. За основу методики выбора состава связки может быть принят выбор соответствующей добавки поверхностно-активного вещества.

В табл. 19 приведены экспериментальные данные определения плотности упаковки минеральных частиц и количества связки в системе при осаждении порошка в расплавах парафина с добавками различных веществ.

Таблица 19

№ п/п.	Состав связки	Кристаллическая основа материала порошка	Плотность упаковки частиц сухого порошка (насыпной) $K_{уп}$	В осадке $K_{уп}$	Количество связки в осадке по весу, %
1	Парафин	$MgOSiO_2$	0,293	0,284	44,40
2	Парафин+касторовое масло		0,293	0,300	40,11
3	Парафин+канифоль		0,293	0,263	48,25
4	Парафин+пчелиный воск		0,293	0,396	34,90
5	Парафин+олеиновая кислота		0,293	0,297	43,10

Из таблицы видно, что при изменении состава добавки существенно изменяется характер образующейся системы: плотность упаковки минеральных частиц возрастает от 0,263 до 0,396, а количество связки уменьшается от 48,25 до 34,9%.

Применение различных термопластичных веществ в качестве основы связки также существенно изменяет свойства получаемых литейных шликеров. В табл. 20 приведены результаты экспериментальной работы по применению различных термопластичных веществ.

Опыты проводились путем приготовления литейных шликеров с применением различных тонкодисперсных порошков (величина частиц меньше 40 *мкн*), полученных в результате мокрого помола. В связи с этим количество связки, приведенное в таблице и необходимое для образования шликера, является завышенным (может быть снижено за счет применения горячего помола). Однако представление о характере изменения свойств шликера в зависимости от состава основы для различных минеральных порошков эти данные дают достаточно верное.

Таблица 20

№ п/п.	Наименование основы связки	Кристаллическая основа материала	Основные параметры системы		
			Количество связки, %	$K_{уп}$	Механическая прочность при 25° на изгиб, *кг/см²*
1	Парафин	$MgOSiO_2$	20,2	0,430	50,4
2	Церезин		21,9	0,400	30,6
3	Головакс		46,0	0,411	78,5
4	Парафин	Al_2O_3	37,1	0,276	23,3
5	Церезин		28,5	0,356	60,1
6	Головакс		46,0	0,254	62,0
7	Парафин	TiO_2	23,7	0,380	67,0
8	Церезин		23,0	0,365	35,6
9	Головакс		38,0	0,331	58,6
10	Парафин	$3Al_2O_32SiO_2$	28,8	0,442	73,1
11	Церезин		31,3	0,417	29,4
12	Головакс		56,1	0,318	79,0

Влияние концентрации ПАВ на свойства шликеров изучалось путем введения различного весового количества ПАВ в связку, исходя из расчета на образование мономолекулярного слоя ПАВ на поверхности частиц, а также 3, 6, 12 и 24 слоев молекул. Весовое количество (в процентах) ПАВ ориентировочно рассчитывалось по вышеприведенной формуле.

Примерный расчет показал, что примерно 1% ПАВ, вводимого в связку, обеспечивает создание мономолекулярного слоя на порошке. В соответствии с этим приготовлялись связки различных составов и из них литейные шликера, у которых определялись основные параметры.

Влияние различных добавок ПАВ и их концентрации на свойства литейных шликеров видно из табл. 21, суммирующей результаты опытов с применением порошка клиноэнстатитового материала мокрого помола.

Таблица 21

№ п/п.	Состав связки				Основные параметры системы			
	Основа		ПАВ					
	Наименование	Количество, %	Наименование	Количество, %	Количество связки, %	Условная вязкость	$K_{уп}$	Механическая прочность при 25°, $кг/см^2$
1	Парафин	99	Стеарин	1	24,1	9,0	0,478	51,6
2		97		3	19,6	27,0	0,555	62,6
3		94		6	19,4	27,5	0,553	67,7
4		88		12	19,5	42,6	0,555	51,7
5		76		24	19,3	87,0	0,561	54,8
6		99	Касторовое масло	1	22,8	23,4	0,498	47,4
7		97		3	22,1	27,5	0,528	69,8
8		94		6	24,3	34,5	0,497	53,2
9		88		12	24,9	16,7	0,473	47,2
10		76		24	24,3	Не определялась	0,487	29,4
11		99	Пчелиный воск	1	25,3	18,8	0,460	111,7
12		97		3	25,3	4,0	0,475	84,3
13		94		6	20,8	10,4	0,532	112,0
14		88		12	19,7	15,7	0,542	108,0
15		76		24	18,7	33,2	0,573	69,2
16		99	Олеиновая кислота	1	22,0	—	0,558	83,4
17		97		3	20,0	13,0	0,552	62,5
18		95		5	20,0	17,0	0,541	55,5
19		93		7	20,0	20,0	0,540	50,0
20		90		10	20,0	23,0	0,556	41,5

Приведенные данные показывают, что для исследованного порошка оптимальные результаты дают добавки пчелиного воска, затем стеарина, олеиновой кислоты и наихудшие — добавки касторового масла. Изменение концентрации ПАВ также приводит к изменению свойств системы.

Общей закономерностью в данном случае можно считать повышение вязкости и уменьшение прочности системы при увеличении концентрации ПАВ сверх определенного предела. Оптимальными следует считать концентрации ПАВ порядка 3—6%.

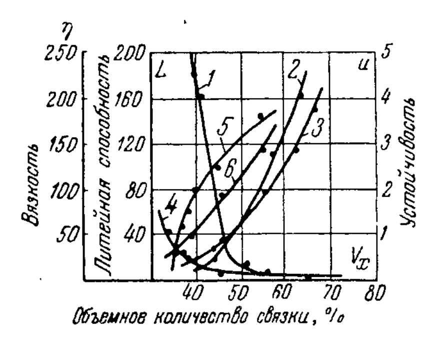
На основании проведенных опытов были выбраны составы связок, которые в настоящее время можно рекомендовать для применения при приготовлении литейных шликеров как наиболее рациональные. Рекомендуемые составы связок, приведенные в табл. 22, проверены в лабораторной и производственной практике и являются почти универсальными для разных порошков.

Таблица 22

Состав по весу, %				
Парафин	Олеиновая кислота	Пчелиный воск	Стеариновая кислота	Примечание
95	5	—	—	
97	—	—	3	
94	—	6	—	

Наряду с влиянием состава связки на свойства литейного шликера весьма велико также значение количества связки в нем с точки зрения его свойств и дальнейшего хода технологического процесса.

Все параметры шликера изменяются в зависимости от количества связки, в связи с чем изменяется также и качество керамических изделий. Количество связки в шликере обычно определяется в процентах по весу. Однако более целесообразно и удобно для анализа влияния количества связки оперировать объемным содержанием связки.



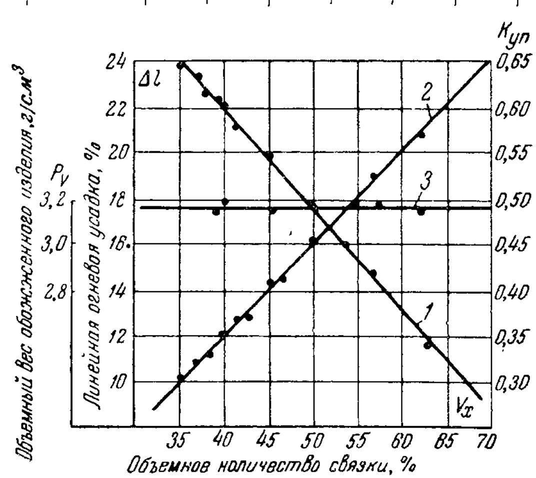
Фиг. 35. Зависимость свойств литейных шликеров от количества связки.

1 — изменение вязкости шликера из клиноэнстатитового материала; 2 — изменение литейной способности шликера из клиноэнстатитового материала; 3 — изменение устойчивости шликера из клиноэнстатитового материала; 4 — изменение вязкости шликера из рутилового материала; 5 — изменение литейной способности шликера из рутилового материала; 6 — изменение устойчивости шликера из рутилового материала.

Экспериментальные работы по определению влияния количества связки на свойства литейных шликеров показали, что с увеличением количества связки уменьшается вязкость и устойчивость шликеров и растет литейная способность. Выявленные зависимости приведены в табл. 23 и на фиг. 35.

Влияние количества связки

№ п/п.	Материал порошка	Состав связки	Количество связки по весу, %	Количество связки по объему, %	Условная вязкость	Устойчивость	Литейная способность	K_{yn}	Линейная огневая усадка	Объемный вес обожженных образцов, $г/см^3$
1	$MgOSiO_2$ Удельный вес 3,107	Парафин 95%, олеиновая кислота 5%	15,3	39,2	Не течет	0,3	12,6	0,609	10,57	2,97
2			15,6	39,7	235,4	0,4	9,7	0,604	11,7	3,01
3			17,0	42,2	204,6	0,7	11,8	0,579	12,35	3,07
4			19,25	46,0	37,5	0,8	29,2	0,542	14,40	2,97
5			22,60	50,3	13,6	1,1	53,0	0,478	16,30	2,97
6			27,80	57,8	3,9	2,1	134,0	0,426	19,45	2,99
7			31,70	62,2	2,6	2,7	153,0	0,341	21,90	2,93
8	$MgOSiO_2$	Парафин 88%, пчелиный воск 12%	17,45	42,8	260	0,9	7,2	0,566	13,60	2,98
9			17,95	43,8	208	0,7	10,2	0,556	13,35	2,94
10			18,20	44,2	139	0,65	11,0	0,563	13,70	2,94
11			21,15	48,8	10,1	1,40	82,1	0,512	15,45	3,01
12			24,45	53,4	5,0	1,85	109,1	0,472	18,60	2,97
13			28,00	58,1	4,7	1,60	124,7	0,400	21,50	2,97
14			31,60	62,2	4,0	2,00	167,0	0,377	22,50	2,94
15	TiO_2 Удельный вес 4,31	Парафин 94%, пчелиный воск 6%	10,3	35,3	42,6	0,7	10,6	0,641	10,30	3,82
16			11,1	37,3	34,3	0,8	31,3	0,620	10,86	3,78
17			11,5	38,1	18,1	0,8	44,0	0,612	11,30	3,76
18			11,75	38,9	21,9	2,5	137,6	0,535	12,10	3,68
19			12,50	40,3	13,6	1,0	69,2	0,604	11,70	3,70
20			12,80	41,3	12,6	1,0	79,5	0,578	12,80	3,86
21			15,25	46,2	10,5	1,7	101,2	0,539	15,20	3,62
22			19,60	51,0	2,2	2,9	146,0	0,466	15,30	3,68



Фиг. 36. Зависимость свойств шликера от количества связки

1 — изменение K_{yn}; 2 — изменение линейной огневой усадки; 3 — объемный вес обожженого изделия.

Интересно отметить, что резкое изменение свойств системы наблюдается при уменьшении количества связки ниже 45% объемных, т. е. при уменьшении толщины адсорбционного слоя связки ниже 0,3—0,4 *мкн*.

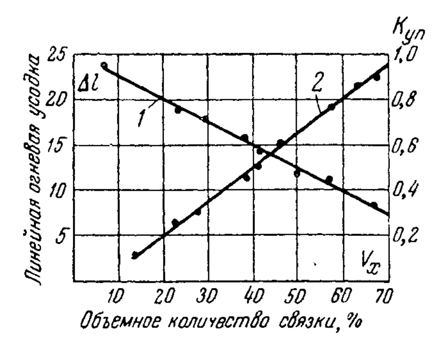
Зависимость плотности упаковки минеральных частиц и огневой усадки от количества связки графически изображена на фиг. 36. Эта зависимость является прямой и может быть приближенно выражена формулой

$$\Delta l \approx \frac{0{,}97 - K_{уп}}{3} \cdot 100\%,$$

где Δl — линейная огневая усадка, %

$K_{уп}$ — коэффициент упаковки.

Эта зависимость является справедливой для различных материалов: так, например, график фиг. 36 построен суммарный по данным табл. 23 и одинаково справедлив как для клиноэнстатитового, так и для рутилового материала.



Фиг. 37. Зависимость плотности упаковки минеральных частиц и полуфабриката и линейной огневой усадки от объемного количества связки. 1 — изменение $K_{уп}$; 2 — изменение линейной усадки.

График на фиг. 37 построен с включением дополнительных экспериментальных данных по шликерам из клиноэнстатитового материала с количеством связки 6—8 и 10% по весу, которые точно вписываются в установленную закономерность, что имеет большое практическое значение. Выявленная зависимость предоставляет возможность достаточно точно корректировать значение огневой усадки путем изменения количества связки на основе расчета по приведенной выше формуле.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛУФАБРИКАТА

1. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТА

Основными методами изготовления полуфабриката, применяемыми в технологии горячего литья, являются: намораживание, литье в кокиль, сливное литье (наружное

намораживание), центробежное литье, непрерывное литье и литье под давлением. Наряду с ними могут применяться методы горячей штамповки и горячего протягивания, а также прессования в холодном состоянии и с подогревом.

Особо следует рассматривать обработку полуфабриката резанием, которая может использоваться не только как вспомогательная операция (для срезки литников), но также и для полной обработки конфигурации полуфабриката.



Фиг. 38. Намораживание.

Намораживание является своеобразной разновидностью литья.

Сущность процесса намораживания заключается в следующем.

Металлическая оправка (форма) погружается в расплавленный литейный шликер (фиг. 38). В результате охлаждения на поверхности оправки (формы) наращивается (намораживается) слой отвердевшего шликера. По достижении определенной толщины слоя оправка с наращенной на ней заготовкой извлекается из литейного шликера

и охлаждается в воде. Полученная заготовка снимается с оправки и подвергается дальнейшим операциям технологического процесса.

С помощью процесса намораживания можно получать заготовки, имеющие точную форму и размеры отверстия. Наружные размеры заготовки получаются неточными. Поэтому обычно заготовки, полученные методом намораживания, подвергаются в дальнейшем механической обработке резанием для придания окончательной формы изделию.

В некоторых случаях, например при изготовлении тиглей и т. п., никакой дополнительной обработки после намораживания не требуется.

Размеры и конфигурация полуфабриката, полученного методом намораживания, зависят от размеров и конфигурации формы и от режимов ведения процесса. Основными параметрами режима процесса намораживания являются температуры формы и шликера и время выдержки формы в шликере.

Выбор режимов зависит от свойств литейного шликера (в первую очередь его теплопроводности) и требуемых размеров (толщины стенки) изделия.

В результате проведенных исследований [Л. 1] установлены основные закономерности и зависимости, существующие между упомянутыми параметрами режима и размерами получаемого изделия, для литейных шликеров из различных материалов.

В табл. 24 приведены экспериментальные данные зависимости толщины намороженного слоя от режимов процесса для шликеров из муллитового материала.

Толщина намороженной стенки изделия увеличивается при понижении температуры формы и температуры шликера и уменьшается при повышении температуры.

Толщина стенки изделия увеличивается при увеличении времени выдержки формы в шликере. При этом в случае применения формы для намораживания без непрерывного охлаждения увеличение времени выдержки вызывает увеличение толщины стенки изделия лишь до определенных пределов, а затем вследствие перегрева формы толщина стенки при дальнейшем увеличении времени выдержки уменьшается (см. фиг. 39).

Для практических целей можно рекомендовать как наиболее удобные для осуществления процесса следующие режимы для намораживания: температура формы $+15 \div +20^\circ$ С (т. е. температура воды из водопровода);

Таблица 24

№ п/п.	Температура шликера, °С	Температура формы, °С	Время выдержки, сек.	Толщина слоя, *мм*	Примечание
1	60	0	5	2,4	
2	60	0	10	3,7	
3	60	0	20	4,5	
4	60	0	30	5,0	
5	60	0	40	5,1	
6	60	0	50	5,0	
7	66	0	60	4,6	
8	60	0	70	4,2	
9	60	0	80	2,9	
10	60	40	10	2,4	
11	60	20	10	3,2	
12	60	10	10	3,5	
13	60	0	10	4,1	
14	60	40	40	1,8	
15	60	20	40	3,7	
16	60	10	40	4,9	
17	60	0	40	5,7	
18	50	0	10	3,9	
19	60	0	10	3,7	
20	70	0	10	3,7	
21	80	0	10	3,3	
22	90	0	10	3,2	
23	100	0	10	2,7	
24	50	0	40	5,2	
25	60	0	40	5,1	
26	70	0	40	3,3	
27	80	0	40	2,3	
28	90	0	40	2,0	
29	100	0	40	2,0	

температура шликера $+60 \div +80°$ С; время выдержки формы в шликере подбирается экспериментально в зависимости от требуемой толщины стенки изделия, размеров формы и ее конструкции (с охлаждением или без охлаждения).

Литье в кокиль. Для изготовления изделий относительно простой формы (кольца, диски, плиты и т. п.) может применяться литье в кокиль (металлическую форму).

Процесс литья осуществляется путем заливки формы из ковша через литниковое отверстие расплавленным литейным шликером.

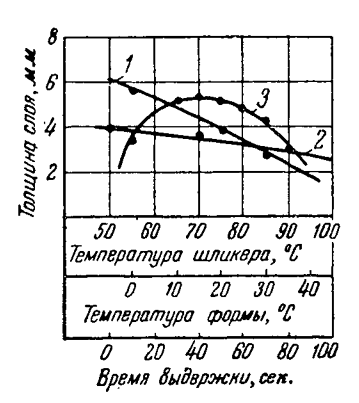
Формообразование полуфабриката, отливки, получается в результате действия гравитационных сил. В связи с этим особое значение приобретает текучесть литейного шликера.

Налитый в форму (кокиль) шликер охлаждается и отвердевает, после чего форма раскрывается и из нее извлекается отливка.

Для компенсации усадочных явлений при охлаждении литейного шликера в форме литник располагается в наиболее толстой части отливаемого изделия и имеет размеры большие, чем самое большое сечение детали. В случае отливки плоских деталей целесообразно применять формы с открытой верхней частью (фиг. 40) и с этой стороны вести заливку. После отливки деталь подвергается необходимой обработке (срезка литника и т. д.).

Качество отливки при литье в кокиль зависит как от свойств литейного шликера, так и рационального выбора конструкции формы, литниковой системы и режимов литья.

Основным требованием, предъявляемым к литейному шликеру, используемому для литья в кокиль, является высокая текучесть (малая вязкость) шликера, необходимая для получения полноценного заполнения формы. Выбор конструкции формы для литья должен производиться на основе ряда правил, излагаемых далее.



Фиг. 39. Зависимость толщины намороженного слоя от режима.

1 — влияние температуры формы; 2 — влияние температуры шликера; 3 — влияние времени выдержки.

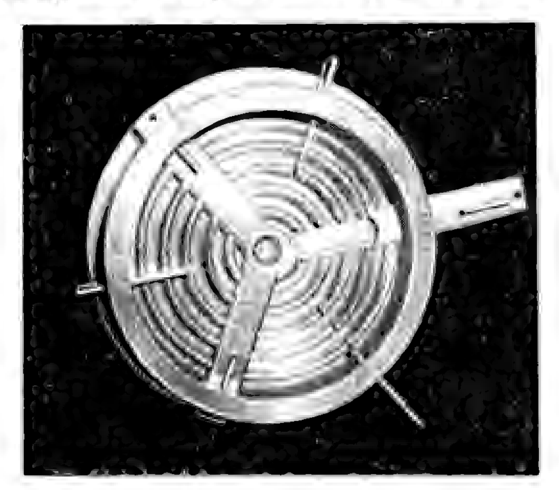
Режимы литья выбираются аналогично режимам намораживания, при этом следует во избежание появления на поверхности отливки складок температуру шликера принимать наивысшую из рекомендуемых (для повышения его текучести), а время выдержки должно соответствовать полному отвердеванию всего залитого в форму литейного шликера.

На фиг. 41 приведены плитки нагревателей, изготовленные из окиси алюминия методом литья в кокиль.

Применение литья в кокиль можно рекомендовать для мелкосерийного и серийного производства.

С л и в н о е л и т ь е применяется в случае необходимости отливки высоких деталей большого диаметра и с относительно небольшой толщиной стенки. Изготовление полуфабриката сливным литьем осуществляется путем заливки

литейного шликера в холодную металлическую форму, имеющую конфигурацию внутренней полости, соответствующую наружной конфигурации отливаемой детали; после некоторого времени выдержки шликера в форме на послед-



Фиг. 40. Кокиль для отливки плиток.



Фиг. 41. Керамические плитки, изготовленные методом литья в кокиль.

ней «намораживается» необходимый слой отвердевшего шликера, а весь остальной (неостывший) шликер выливается из формы, оставляя отверстие в отливке.

Таким образом, получается отливка с точной наружной конфигурацией и отверстием, поверхность которого примерно повторяет конфигурацию наружной поверхности. Этот

процесс отличается от процесса намораживания тем, что при намораживании точное оформление получает внутренняя часть отливки, а при сливном литье — наружная.

Режимы при сливном литье выбираются такие же, как и при намораживании.

Полученные сливным литьем отливки, как правило, подвергаются в дальнейшем механической обработке резанием для придания изделию окончательной конфигурации.

Центробежное литье состоит в том, что частицам материала (металла), введенного во вращающуюся форму, сообщаются центробежные силы; под их действием жидкий материал (металл) прижимается к стенкам формы и в этом состоянии при охлаждении затвердевает[1].

При достаточно большом числе оборотов внутренняя поверхность отливки получает форму, близкую к цилиндру, с осью, практически совпадающей с осью вращения. Недостаточное число оборотов создает опасность получения отливки искаженной формы с неправильными размерами[2].

Опыты изготовления керамического полуфабриката из горячих литейных шликеров методом центробежного литья впервые проводились автором в 1946 г. и показали, что центробежное литье керамического полуфабриката обладает рядом специфических особенностей. Детали, изготовленные этим методом, имели ряд дефектов, которые возникали в результате неравномерности упаковки минеральных частиц в полуфабрикате. Эта неравномерность упаковки объясняется: а) разностью расстояния частиц от центра вращения, вследствие чего они имеют различные центробежные силы, и различием в размерах минеральных частиц; б) тем, что более крупные частицы развивают бо́льшие центробежные силы по сравнению с мелкими, и в) наличием в системе (литейном шликере) двух фаз: минеральной части и связки, обладающих различными свойствами.

Перечисленные причины усложняют процесс центробежного литья горячих литейных шликеров по сравнению с центробежным литьем металлов.

С целью выбора режима центробежного литья керамического полуфабриката было проведено исследование влияния окружной скорости на качество отливки полуфабриката и поведение отливок при обжиге. Опыты проводились

---

[1] П. П. Жевтунов и др., Специальные виды литья, Машгиз, 1948.

[2] П. Г. Новиков и др., Основы центробежного литья, Машгиз, 1947.

с использованием литейных шликеров из клиноэнстатитового и муллитового материалов. В качестве формы образца было принято кольцо как самая простейшая форма тела вращения. Кольца отливались двух диаметров: 54 и 74,5 *мм*. Время выдержки при вращении было установлено постоянным и равным 2 мин. Охлаждение производилось во время вращения водой.

Определение давления шликера на стенки формы, возникающего при центробежном литье, производилось вычислением по формуле

$$C = \frac{\gamma}{3g} \cdot \omega^2 \left(r_1^2 - \frac{r_2^3}{r_1} \right) [г/см^2],$$

где γ — удельный вес материала;
g — ускорение силы тяжести;
$\omega = \frac{\pi n}{30}$ — угловая скорость;
r_1 — расстояние от центра вращения до внешнего диаметра;
r_2 — расстояние от центра вращения до внутреннего диаметра.

Результаты экспериментальной работы приведены в табл. 25.

Таблица 25

№ п/п.	Материал	Число об/мин	Диаметр формы, *мм*	Окружная скорость, *м/мин*	Давление на форму, *кг/см²*	Количество связки в полуфабрикате после отливки	Плотность полуфабриката $K_{уп}$	Огневая усадка, %
1	Шликер из клиноэнстатита	268	54,0	45	2,5	21	0,52	16,5
2		386	74,5	90	7,0	21,6	0,52	13,0
3		1 032	54,0	175	36,0	18,2	0,57	—
4		500	54,0	255	76,0	16,5	0,59	—
5		500	74,5	351	108,2	16,2	0,60	10,7
6		150	74,5	500	222,0	16,5	0,60	—
7	Шликер из муллита	268	54,0	45	—	25,0	0,49	13,8
8		386	74,5	90	—	—	0,49	—
9		1 032	54,0	175	—	24,0	0,50	11,7
10		500	54,0	255	—	24,2	0,50	10,8
11		500	74,5	351	—	22,2	0,51	—
12		150	74,5	500	—	19,7	0,52	—

Из табл. 25 видно, что увеличение числа оборотов при центробежном литье влечет закономерное увеличение плотности упаковки минеральных частиц в полуфабрикате за счет вытеснения связки, количество которой также закономерно изменяется от периферии к центру.

Вытесненная связка отделяется на внутренней поверхности отливки (см. фиг. 7).

Изменение плотности полуфабриката влечет закономерное уменьшение огневых усадок: с увеличением $K_{уп}$ огневые усадки уменьшаются.

Следует отметить, что при обжиге деталей, отлитых методом центробежного литья, в результате имеющейся неравномерности структуры полуфабриката иногда появляются трещины и расслоения.

При применении малых чисел оборотов или при механической обработке деталей после отливки (по наружному и внутреннему диаметрам), а также при применении литейных шликеров с небольшим количеством связки удается избегнуть указанных дефектов.

В связи с этим применять центробежное литье следует лишь в необходимых случаях, тщательно выбрав применительно к данной детали режимы литья.

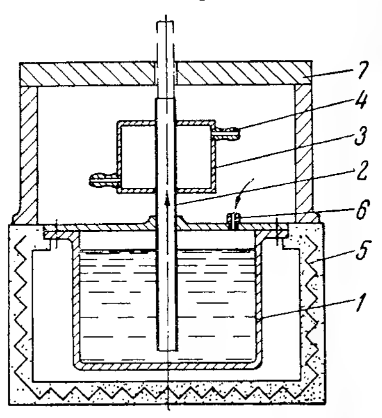
Непрерывное литье. При заполнении горячим шликером, доведенным до легкоподвижного состояния, холодной металлической формы он принимает очертания формы, а затем, охлаждаясь, переходит в твердое состояние. Эта способность шликера переходить при охлаждении из одного агрегатного состояния в другое используется для осуществления процесса непрерывного литья путем обеспечения постоянного подвода жидкого шликера в неподвижную форму и отвода оформленного полуфабриката.

Способ непрерывного литья предназначается для отливки изделий с постоянным поперечным сечением (стержни круглого сечения, трубки и т. п.).

Процесс осуществляется следующим образом.

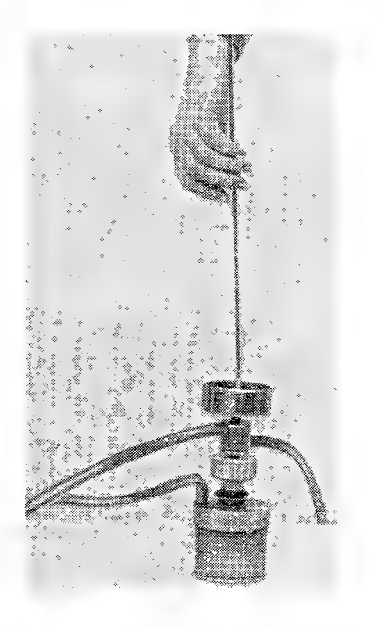
В формующую трубку (форму) поступает (снизу) под давлением разогретый жидкий шликер. В верхней части формующей трубки шликер застывает и принимает форму канала. Нижний конец формующей трубки помещен в бак с горячим шликером, а верхний интенсивно охлаждается. Таким образом, в формующем канале (трубке) обеспечивается температурный перепад, от температуры плавления до температуры отвердевания литейного шликера.

При застывании шликер претерпевает объемную усадку с уменьшением диаметра отливаемого образца, что облегчает выталкивание готового образца непрерывно поступающим жидким шликером. Режим процесса необходимо при этом отрегулировать таким образом, чтобы скорость застывания шликера равнялась или немного опережала скорость поступления горячего шликера. На основании вышеизложенных соображений была разработана принципиаль-



Фиг. 42. Схема устройства для непрерывного литья.

1—рабочий бак; 2—формующая трубка; 3—холодильник; 4 —штуцер для воды; 5 — термостат; 6— штуцер для сжатого воздуха; 7 —направляющая плита.



Фиг. 43. Лабораторная установка для непрерывного литья.

ная схема аппарата для непрерывного литья [Л. 16], приведенная на фиг. 42.

Работает аппарат следующим образом: в рабочий бак *1* заливается разогретый шликер; затем устанавливается формующая трубка *2*, имеющая внутренний диаметр, равный диаметру отливаемого стержня.

На формующую трубку одевается холодильник *3*, снабженный штуцерами *4* для подвода и отвода охлаждающей воды.

Рабочий бак аппарата для поддерживания постоянной температуры шликера помещается в термостат *5*.

Сжатый воздух подводится в рабочий бак через штуцер *6*. При подаче сжатого воздуха в бак воздух давит на поверхность шликера и подает его в формующую трубку. При

достижении шликером в формующей трубке зоны, охлаждаемой водой, он застывает и выдавливается из формующей трубки непрерывно поступающим снизу жидким шликером. Отвердевший стержень, выходя из трубки, проходит через направляющее отверстие плиты 7.

Готовый полуфабрикат режется на отрезки необходимой величины.

На фиг. 43 представлена фотография лабораторной установки для непрерывного литья.

Производительность процесса непрерывного литья зависит от давления, температуры шликера и температуры охлаждающей воды.

Экспериментальные данные[1] зависимости производительности процесса от перечисленных параметров, полученные на лабораторной установке, приведены в табл. 26.

Таблица 26

№ п/п.	Давление, *атм*	Температура охлаждающей воды, °С	Температура шликера, °С	Производительность (скорость выхода стержня) *см/мин*	Примечание
1	1,5	10	63	19,5	
2	2,0	10	63	23,0	
3	2,5	10	63	33,0	
4	3,0	10	63	40,0	
5	3,5	10	63	48,5	
6	4,0	10	63	—	Выходит жидкий шликер
7	4,0	8	63	60,0	
8	2,5	14	60	23,5	
9	2,5	10	(3	33,0	
10	2,5	10	65	33,0	
11	2,5	7	70	39,0	
12	2,5	5,5	73	27,0	
13	2,5	5,5	75	—	Выходит жидкий шликер

Следовательно, повышение производительности может быть достигнуто увеличением давления на шликер и понижением температуры охлаждающей воды. Повышение температуры шликера уменьшает производительность и вызывает необходимость снижения температуры охлаждающей

[1] Экспериментальные работы выполнялись инж. Н. Рофман под руководством автора.

воды, так как в противном случае шликер не успевает отвердеть в формующей трубке.

Исследование свойств обожженных изделий, полученных непрерывным литьем, показало приемлемость этого метода для изготовления высококачественных изделий.

Литье под давлением является одним из наиболее универсальных и высокопроизводительных методов литья, получило наибольшее применение в производстве, а потому далее рассматривается особо.

Остальные перечисленные выше методы изготовления полуфабриката применяются в технологии горячего литья как вспомогательные лишь в тех случаях, когда не представляется возможным использовать основные методы.

Прессование применяется главным образом для изготовления плоских деталей с отношением диаметра изделия к высоте не более как 1 : 3.

Процесс прессования осуществляется обычным в керамической технологии путем — с помощью металлических прессформ на гидравлических прессах. Давление прессования выбирается в пределах 300—700 *кг/см²*.

Прессование может производиться из пресспорошка или разогретого шликера. Пресспорошок приготовляется путем механического измельчения отвердевшего шликера (резанием на токарном станке) с последующим рассевом стружки через сита или протиранием шликера при температуре 45° через сита, а также путем распыления шликера сжатым воздухом (пульверизатором) с последующим рассевом и фракционированием полученного порошка.

Полученный пресспорошок следует хранить при температуре не более 25—28°. Прессование такого порошка производится при комнатной температуре.

Прессование может также производиться из навески шликера, разогретого до $T = 45—50°$; в этом случае иногда целесообразно подготовить заготовки необходимого веса в виде брикетов соответствующих размеров. Прессформа не разогревается.

Протягивание применяется для изготовления изделий с постоянным поперечным сечением (стержни, трубки и т. п.) и осуществляется аналогично обычному протягиванию пластичных керамических масс с помощью металлического мундштука и пресса. Отличительной особенностью является необходимость разогрева мундштука и материала до температуры 40—50°.

Механическая обработка резанием используется глав-

ным образом как дополнительная операция, завершающая процесс оформления изделий (срезка литников и т. п.). Эта обработка производится на обычных металлорежущих станках (токарном, сверлильном, строгальном, фрезерном) с помощью режущего инструмента с пластинками из твердых сплавов.

Незначительные усилия, возникающие при резании, позволяют применять упрощенные способы крепления заготовок на станках. Как правило, обработка и крепление заготовки производятся на оправках (или во втулках) за счет силы трения без дополнительного механического прижима.

Наиболее часто применяемые режимы резания:

скорость резания	$v = 100 \div 120$ *м/мин*
подача	$s = 0{,}1 \div 0{,}3$ *мм/об*
глубина резания	$t = 1 \div 4$ *мм*

2. ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Литье под давлением осуществляется путем заполнения металлической формы литейным шликером (при определенных температурах формы и шликера и необходимом давлении), выдержки формы под давлением в течение времени, необходимого для охлаждения шликера, и выемки отливки из формы.

Для осуществления литья под давлением (ЛПД) применяются специальные машины, обеспечивающие питание формы шликером под соответствующим давлением.

На качество отливки при литье под давлением влияют свойства литейного шликера, режимы литья, конструкция формы и конструкция машины для литья.

Процесс отливки разбивается на два этапа: заполнение формы шликером и отвердевание его в форме.

При заполнении формы поток шликера движется в полости формы с определенной скоростью, охлаждаясь при этом о стенки формы и вытесняя из полости формы воздух. В зависимости от конфигурации отливаемого изделия поток шликера идет сплошной массой, подымаясь снизу вверх, или, встречая на своем пути преграды (стенки, штыри и т. п.), разделяется на несколько потоков, которые, обойдя встретившуюся преграду, должны слиться воедино. Таким образом, характер процесса заполнения формы шликером зависит от целого ряда факторов, к числу которых в первую очередь можно отнести:

а) скорость заполнения;

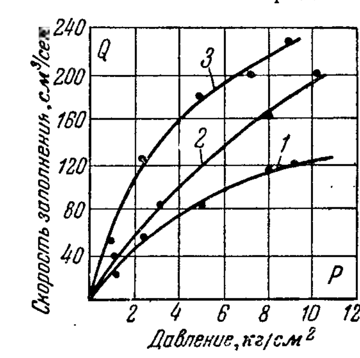
б) конфигурацию и размеры отливаемого изделия;

в) конструкцию формы для литья.

Скорость заполнения формы литейным шликером определяется объемной и линейной скоростями заполнения.

Объемная скорость заполнения определяет время, необходимое для заполнения формы. Зная объемную скорость заполнения Q [$см^3/сек$] и объем формы $V_ф$ [$см^3$], можно время заполнения t определить по формуле

$$t = \frac{V_ф}{Q} \text{ [сек.]}.$$



Фиг. 44. Зависимость объемной скорости заполнения от давления.

1 — при температуре шликера 60°; 2 — при температуре шликера 70°; 3 — при температуре шликера 80°.

Линейная скорость заполнения характеризует возможность полноценного заполнения формы (без недоливов и т. п.).

При данных линейной скорости заполнения формы (скорости подъема уровня шликера в форме), толщине стенки отливаемого изделия и данной скорости кристаллизации применяемого литейного шликера заполнение формы возможно только в том случае, если время, необходимое для отвердевания заданной толщины стенки, больше, чем время, необходимое на заполнение формы.

Линейная скорость заполнения может быть подсчитана по формуле

$$v_л = \frac{Q}{F},$$

где Q — объемная скорость истечения шликера, $см^3/сек$;
F — площадь проходного сечения формы, $см^2$.

Объемная скорость заполнения зависит от свойств литейного шликера, режимов литья (давления и температуры шликера), а также в некоторой мере от размеров литникового отверстия в форме.

К числу основных свойств литейного шликера, влияющих на скорость заполнения, относятся вязкость (текучесть) и литейная способность.

Уменьшение вязкости и повышение литейной способности приводит к увеличению скорости заполнения.

Влияние режимов литья видно из табл. 27 и фиг. 44. Определение объемной скорости заполнения произво-

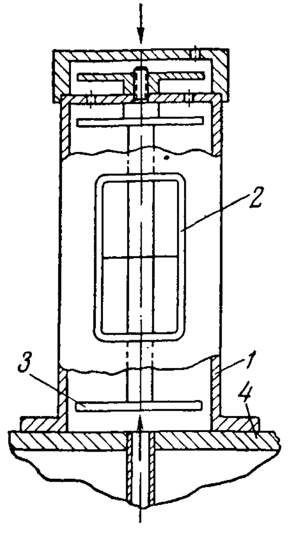
Таблица 27

Температура шликера, °C	Скорость истечения шликера, $см^3/сек$, при давлении, *ат*					
	1,0	2,5	5,0	7,5	9,0	10,0
60	25	68	87	110	—	—
70	43	85	97	164	—	208
80	50	133	174	196	227	—
90	49	137	154	227	263	—
100	52	145	222	270	—	—

дится с помощью специального прибора, общий вид которого приведен на фиг. 45.

Прибор устанавливается на аппарат для литья под давлением и заполняется шликером при заданных режимах. Время, необходимое для заполнения прибора при данных режимах до риски, отмечающей объем 1 *л*, фиксируется с помощью секундомера, а затем подсчитывается значение Q по формуле

$$Q = \frac{1\,000}{t} \left[\frac{см^3}{сек} \right].$$



Фиг. 45. Схема устройства прибора для определения объемной скорости заполнения.

1 — корпус; *2* — окно из плексигласа; *3* — отражатель; *4* — стол литейного аппарата.

Как видно из приведенных в табл. 27 данных, скорость заполнения увеличивается при повышении температуры шликера и давления.

В зависимости от конфигурации и размеров отливаемого изделия характер процесса заполнения формы шликером при постоянной скорости заполнения существенно изменяется.

При движении в полости формы (между стенок) шликер охлаждается о стенки формы, и чем меньше толщина стенки отливки, тем больше интенсивность охлаждения шликера.

В результате этого при небольших толщинах стенки (1—1,5 *мм*), низкой температуре шликера и невысоких скоростях заполнения шликер может в процессе заполнения охладиться до температуры отвердевания, не полностью за-

полнив форму. Это явление известно в производстве под термином «недолив». Недолив является явным производственным браком. Наряду с недоливом охлаждение шликера в процессе заполнения формы может привести также к появлению другого рода дефектов отливки — так называемым «неслитинам». Неслитины образуются в результате неполноценного слияния двух или нескольких потоков шликера, в результате его чрезмерного охлаждения при заполнении формы. Весьма часто после отливки неслитина еле заметна в виде следа на поверхности в месте слияния потоков шликера, но при дальнейшей термической обработке в месте неслитины (т. е. в ослабленном месте) могут образоваться трещины. Поэтому в случаях отливки изделий сложной конфигурации и тонкостенных выбору рационального хода заполнения формы шликером должно уделяться серьезное внимание.

Не менее существенным фактором, влияющим на ход процесса заполнения формы шликером, является конструкция формы и, в частности, выбор расположения и размеров литниковой системы и выбор расположения каналов для выхода воздуха из полости формы. В зависимости от размеров литникового отверстия при постоянной объемной скорости заполнения меняется скорость впуска шликера в форму, что в свою очередь может влиять на направление заполнения формы.

При небольшой скорости впуска шликер будет заполнять форму снизу вверх, вытесняя воздух из полости формы в воздушные каналы. При чрезмерно большой скорости впуска струя шликера фонтаном бьет в верхнюю стенку формы, шликер стекает по боковым стенкам и заполнение формы идет сверху вниз.

При этом воздушные каналы перекрываются слоем отвердевшего шликера, и в теле отливки остается воздух в виде довольно крупных пустых полостей.

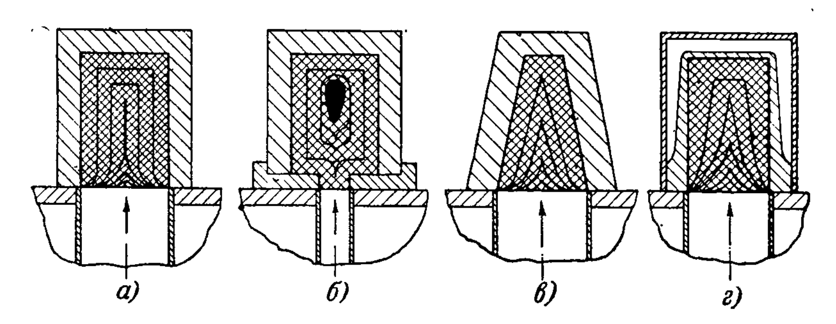
Наряду с размерами литниковых отверстий расположение их также имеет значение при заполнении формы. В зависимости от расположения литников шликер при своем движении в форме может встретить некоторое количество препятствий в виде штырей и т. п., разделяющих поток и приводящих к соответствующему количеству точек слияния раздельных потоков шликера.

Рациональное расположение литниковых отверстий обеспечивает отсутствие или минимальное число точек слияния отдельных потоков шликера.

На втором этапе процесса отливки происходят охлаждение и отвердевание шликера в форме. В зависимости от интенсивности и направления охлаждения, температуры шликера, размеров и расположения литниковой системы, а также конфигурации отливки механизм процесса отвердевания видоизменяется, что существенно влияет на качество изделия.

На фиг. 46 приведено несколько схем механизма отвердевания шликера в форме при различных размерах литника, направлении охлаждения и конфигурации отливки.

Охлаждение шликера в форме проходит от стенок формы, имеющих более низкую температуру (от 0 до +30°),



Фиг. 46. Схемы механизма отвердевания шликера в форме.

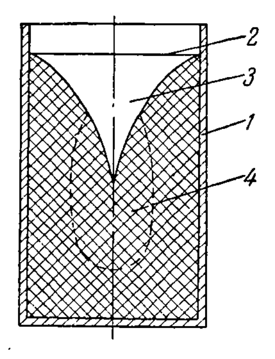
а — при цилиндрической форме, большом литнике и равномерном охлаждении; *б*—при цилиндрической форме, малом литнике и равномерном охлаждении; *в* —при конусной форме, большом литнике и равномерном охлаждении; *г* — при цилиндрической форме, большом литнике и неравномерном охлаждении.

чем шликер. Процесс охлаждения (отвердевания) шликера происходит в течение определенного отрезка времени, следовательно, если рассматривать ход процесса отвердевания через какие-то небольшие промежутки времени T, то каждому такому промежутку времени будет соответствовать отвердевание слоя шликера определенной толщины, зависящей от условий охлаждения.

На схемах фиг. 46 механизм процесса отвердевания условно представлен как протекающий послойно (в действительности за бесконечно малый промежуток времени dt будет происходить приращение бесконечно малой толщины слоя шликера dy и, следовательно, процесс будет не ступенчатый, послойный, а непрерывный).

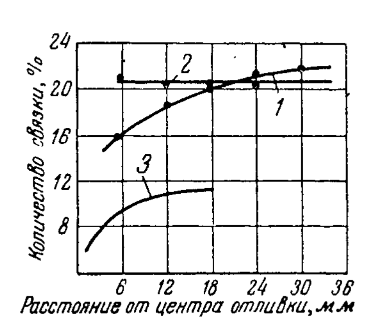
При этом следует напомнить, что литейный шликер при охлаждении переходит из жидкого состояния в твердое, уменьшаясь в объеме (гл. 2). Если, например, заполнить

расплавленным литейным шликером металлический стакан, а затем, охлаждая стенки и дно стакана, охладить находящийся в нем литейный шликер, то последний, отвердевая, будет уменьшаться в объеме, и в теле отливки появится усадочная раковина, образующаяся со стороны открытой поверхности шликера (неохлаждавшейся) в виде воронки (фиг. 47). При этом если рассмотреть отливку в осевом сечении, то легко заметить, что в ее центре (позиция *4*) имеются рыхлоты (в виде белесого выцвета). Исследование структуры показало, что в отливке имеет место неравномерное распределение связки. При охлаждении шликера на поверхности стакана слой шликера отвердевает за счет



Фиг. 47. Отливка с открытой усадочной раковиной.

1 — металлический стакан; *2* — уровень залитого шликера; *3*—усадочная раковина; *4*—рыхлота (белесый выцвет).



Фиг. 48. Диаграмма распределения связки в отливке.

1 — в сечении по середине отливки при шликере с 17% связки; *2* — в сечении по нижней части отливки при шликере с 17% связки; *3* — в сечении по середине отливки при шликере с 10% связки.

кристаллизации связки, имеющейся в системе, которая при этом уменьшается в объеме. Это уменьшение объема компенсируется притоком связки, находящейся в смежном слое в расплавленном состоянии.

Таким образом, при охлаждении связка мигрирует из центра к периферии. При охлаждении центральной части отливки ощущается недостаток связки (так как при охлаждении наружных слоев центральные обеднены связкой), вследствие чего в центре образуется отличная от периферии структура. На фиг. 48 показаны кривые, характеризующие распределение связки в отливке. Следует отметить, что в нижней охлаждавшейся части отливки перепада в количестве связки от периферии к центру не наблюдается.

При литье под давлением изменение объема шликера при отвердевании должно компенсироваться непрерывным притоком шликера, находящегося под давлением, и, следовательно, усадочных раковин, подобных приведенной на фиг. 47, не должно быть.

Указанное обеспечивается только при условии правильного выбора системы охлаждения, размеров и расположения литниковой системы, а также режимов литья.

На фиг. 46,*а* изображена схема отвердевания шликера в цилиндрической форме при равномерном охлаждении со всех сторон и большом (равном диаметру формы) литниковом отверстии. Как видно из схемы, в результате охлаждения в теле отливки вследствие компенсации усадок усадочной раковины не образуется. Однако в центре отливки будет иметь место небольшая рыхлость вследствие того, что компенсация усадочных явлений в последний момент отвердевания шликера в центре будет затруднена.

При равномерном охлаждении формы со всех сторон и небольшом литниковом отверстии (фиг. 46,*б*) в центре отливки образуется усадочная раковина. Образование раковины является результатом того, что шликер в небольшом литниковом отверстии охладится и затвердеет раньше, чем в центре отливки; следовательно, шликер после отвердевания литника будет охлаждаться и уменьшаться в объеме без компенсации усадочных явлений. Усадка проявится в виде раковины (пустоты) в теле отливки.

Наиболее однородная структура отливки при равномерном охлаждении получается при отливке в конусную форму (фиг. 46,*в*). В этом случае усадочная раковина как бы «выталкивается» в литник.

Аналогичная картина механизма отвердевания получается при направленном охлаждении, т. е. неравномерной интенсивности охлаждения отдельных элементов формы.

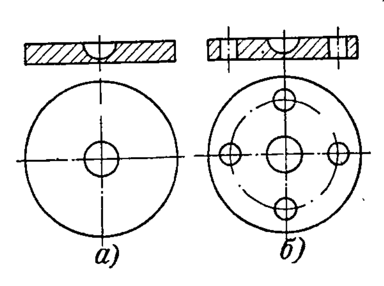
На фиг. 46,*г* изображена схема механизма отвердевания при направлении охлаждения сверху вниз (к литниковому отверстию).

В этом случае за счет направления охлаждения образуются конусные слои отвердевания и структура отливки получается совершенно однородной.

Приведенные схемы отвердевания применительно к простейшим формам отливки характеризуют, однако, в целом механизм отвердевания и влияние основных факторов на ход процесса. Анализ механизма отвердевания шликера

в формах сложной конфигурации (по аналогии с приведенными схемами) позволяет рационально выбирать размеры и расположение литниковой системы и расположение элементов системы охлаждения.

При этом следует учитывать, что объемные изменения литейного шликера при охлаждении протекают не только в жидком состоянии и при изменении агрегатного состояния (из жидкого в твердое), но и в твердом состоянии при охлаждении от температуры кристаллизации до температуры формы. Эти последние объемные изменения приводят к изменению линейных размеров отливки по сравнению с размерами формы. В результате этого при охлаждении отливка плотно садится на оформляющие отверстия стержни формы, а при наличии нескольких стержней (отверстий) в отливке возникают напряжения вследствие того, что зафиксированное в форме положение стержней препятствует прохождению линейной усадки.



Фиг. 49. Конфигурация образцов для испытания на пробивное напряжение.

а—без боковых отверстий; *б* —с отверстиями, обусловливающими натяжение на штырях при переохлаждении отливки в форме.

В результате этого чрезмерное переохлаждение отливки в такого рода форме может привести к появлению трещин в отливке или при дальнейшей термической обработке изделия.

Проведенные нами исследования показали, что возникающие в результате указанной причины дефекты структуры полуфабриката, если они даже не проявляются внешне в виде трещин и подобных явных дефектов, оказывают влияние на свойства обожженных изделий.

Так, например, если отлить образцы для испытания на пробивное напряжение, конфигурация которых приведена на фиг. 49, то в случае чрезмерного переохлаждения образца фиг. 49,*б* в форме показатели пробивного напряжения у такого обожженного образца оказываются на 20—40% ниже, чем у образца фиг. 49,*а*, не испытывавшего натяжения на штырях в результате охлаждения отливки.

При своевременной выемке (без переохлаждения) отливки из формы указанного нарушения структуры и снижения качества изделия не наблюдается.

Таким образом, из приведенного анализа механизма процесса литья видно, что на качество отливки влияет целый комплекс факторов, перечисленных в начале настоящей главы, подробное рассмотрение которых приводится ниже.

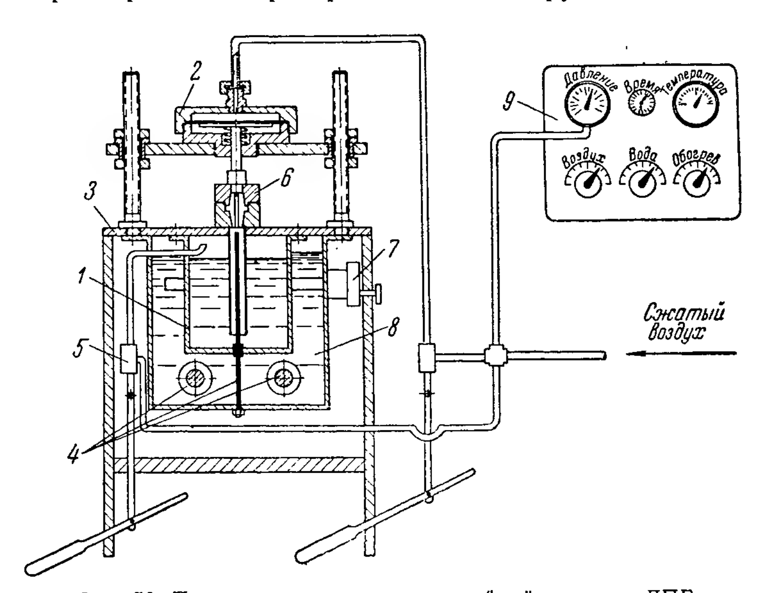
3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Для осуществления процесса горячего литья керамических изделий под давлением должны применяться специальные литейные машины, обеспечивающие соблюдение технологических требований. Литейные машины, применяющиеся для литья металлов под давлением, несмотря на разнообразие имеющихся конструкций, мало пригодны для горячего литья керамических изделий.

Это объясняется большим различием в свойствах металлических расплавов и керамических литейных шликеров. Так, например, самые первые опыты литья под давлением керамических изделий, проводившиеся с применением литейных машин поршневого действия (которые наиболее распространены при литье металлов), показали неприемлемость машин этого типа. При работе таких машин в неизбежный зазор между поршнем и цилиндром устремляется технологическая связка, а частицы порошка набиваются плотным слоем около зазора. После непродолжительной работы поршень заедает. Кроме того, вследствие утечки технологической связки в процессе работы меняются свойства литейного шликера и стабилизировать технологический процесс почти невозможно. В 1948—1950 гг. были разработаны специальные устройства для горячего литья под давлением керамических изделий [Л. 2]. Затем в результате большой серии экспериментальных работ эти устройства получили несколько вариантов конструктивного решения и в настоящее время применяются на производстве в виде литейных машин ЛПГ [Л. 2] и литейных автоматов типа ЛАГ [Л. 17]. Несмотря на существующее разнообразие в конструктивном оформлении литейных машин типа ЛПГ, общая принципиальная схема всех применяемых конструкций машин одинакова. На фиг. 50 приведена принципиальная схема литейной машины типа ЛПГ, в основу которой положены применение термостатического герметического рабочего резервуара и использование давления сжатого воздуха для подачи литейного шликера в форму. Основные узлы литейной машины ЛПГ: термостатический рабочий бак, прижимное устройство, станина или рабочий стол, пульт управления.

Узел термостатического рабочего бака состоит из металлического резервуара, питающего устройства, нагревателей и термостата с терморегулятором.

Металлический резервуар является емкостью для литейного шликера и представляет собой обычно стальной цилиндр с герметично приваренным дном и трубкой для пода-



Фиг. 50. Принципиальная схема литейной машины ЛПГ.

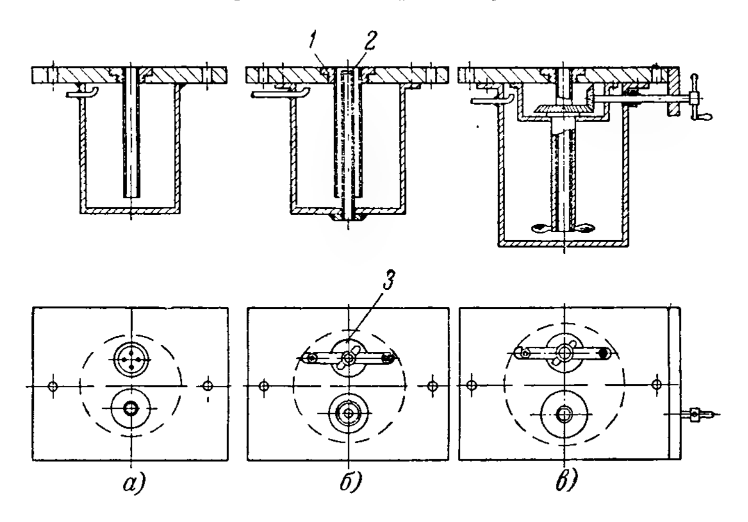
1 — термостатический рабочий бак; *2* — прижимное устройство; *3* — станина или рабочий стол; *4* — электрообогреватели; *5* — воздушный клапан; *6* — форма; *7* — терморегулятор; *8* — вода или масло; *9* — пульт управления.

чи сжатого воздуха. Сверху цилиндр закрыт рабочей плитой, к которой он крепится сваркой (фиг. 51,*а*) или на болтах (фиг. 51,*б*). Рабочая плита служит для установки на нее форм при литье и крепления бака на термостате. Рабочая плита имеет отверстие для крепления питающего устройства и лючок, через который в бак загружается литейный шликер. В некоторых случаях на рабочей плите крепится прижимное устройство. Для установки стержневого обогревателя в ряде случаев ко дну бака приваривается труба с заглушенным верхним концом, расположенная соосно с отверстием для крепления питающего устройства. В целях предотвращения расслаивания литейного шликера в рабочем баке при длительном пребывании в нагретом виде целесообразно предусматривать механизм для периодиче-

ского или непрерывного перемешивания шликера непосредственно в баке.

Схема простейшего конструктивного решения устройства для перемешивания, получившего применение в производственной практике, приведена на фиг 51,*в*.

Пропеллерная мешалка подвешивается в подшипнике на рабочей плите и через коническую пару шестерен периоди-



Фиг. 51. Конструктивные схемы металлических резервуаров ЛПГ.
а — сварная конструкция; *б* — крепление на болтах; *в* — резервуар с пропеллерной мешалкой; *1* — питающее устройство; *2* — трубка для обогревателя; *3* — лючек для загрузки шликера.

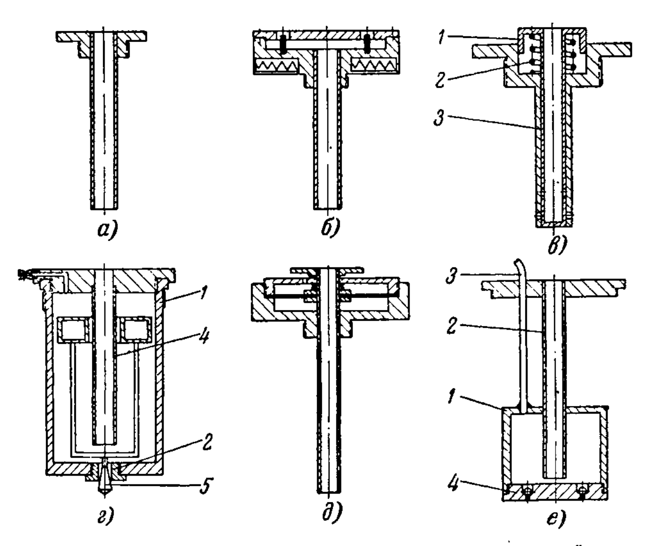
чески вращается с помощью рукоятки, выведенной за пределы бака.

Питающее устройство служит для сообщения рабочей полости бака с устанавливаемой на рабочую плиту формой. В зависимости от типа отливаемой детали, конструкции формы и характера производства применяются различные питающие устройства. Простейшим видом питающего устройства является трубка с резьбовой головкой, ввернутая (или впаянная) в рабочую плиту бака таким образом, что нижний конец трубы не доходит до дна бака на 10—15 *мм*.

На фиг. 52,*а* приведена схема простейшего питающего устройства. При подаче сжатого воздуха в бак горячий шликер поднимается по трубе и под давлением заполняет форму, установленную на фланце трубы. По окончании про-

цесса отливки давление сбрасывается, и шликер в трубе опускается вниз до уровня шликера, находящегося в рабочем баке.

Существенными недостатками устройства являются повышенный расход воздуха при уменьшении количества шликера, находящегося в рабочем баке, и связанное с этим снижение темпа работы, так как заполнение сжатым возду-



Фиг. 52. Конструктивные схемы питающих устройств.

а — простейшее устройство; *б* — многоместное питающее устройство; *в* — клапанное питающее устройство *г* — непрерывного действия; *д* — мембранное; *е* — с шариковыми клапанами.

хом пустой емкости бака и выпуск из него воздуха сопряжены с определенными потерями времени.

Однако исключительная надежность и простота устройства позволили широко использовать его для процесса литья под давлением.

Имеют также применение конструкции питающих устройств, принципиальные схемы которых приведены на фиг. 52,*б*—*д*.

На фиг. 52,*б* изображено многоместное питающее устройство, отличающееся от предыдущего наличием дополнительной камеры на головке, позволяющей распределять шликер на несколько гнезд формы.

Для предохранения от охлаждения шликера у основания головки вмонтирован электронагреватель.

На фиг. 52,*в* приведена схема клапанного питающего устройства, состоящего из двух сочетающихся труб *1* и *3*.

Подвижная труба *1* снабжена окнами и цилиндрической частью, запирающей доступ шликера в нее из бака. При установке формы (кокиля) на фланец трубы *1* последняя под давлением прижимного устройства опускается вниз, отверстия (окна) в трубах *1* и *3* совмещаются и открывается доступ шликеру, находящемуся в рабочем баке под постоянным давлением воздуха во внутреннюю полость трубы *1*.

Шликер поднимается по трубе и заполняет форму. При снятии давления с формы труба *1* поднимается под действием пружины *2* вверх и прекращает поступление шликера.

Описанная конструкция снижает расход сжатого воздуха до минимума и способствует повышению производительности. Однако, как показала экспериментальная проверка, устройство имеет также недостатки. Даже при очень точной подгонке подвижных деталей *1* и *3* в зазор между ними устремляется связка и мельчайшие минеральные частицы, в результате чего периодически нарушается работа устройства из-за заедания трубы *1* в трубе *3*. Кроме того, отделение связки приводит к оседанию на дно бака шликера с пониженным содержанием связки. Однако положительные особенности описанной конструкции служат основанием для ее применения при отливке тонкостенных деталей.

На фиг. 52,*г* приведена конструктивная схема питающего устройства непрерывного действия, предназначенного для автоматов и полуавтоматов.

Принцип действия устройства заключается в следующем.

Цилиндр *1* питающего устройства ввертывается в рабочий бак со шликером. В рабочий бак подается давление сжатого воздуха.

Под влиянием давления шликер устремляется в цилиндр питающего устройства через калиброванное отверстие втулки *2* и начинает его наполнять со скоростью, пропорциональной давлению сжатого воздуха и диаметру калиброванного отверстия.

Когда шликер заполнит на $^2/_3$ цилиндр питающего устройства, начинается работа: давление сжатого воздуха подается в штуцер *3*; под влиянием давления шликер поднимается по трубе *4* и заполняет форму, установленную на фланце трубы. Во время подачи воздуха в штуцер *3*

заполнение цилиндра питающего устройства прекращается, так как создается равновесие давлений в цилиндре питающего устройства и рабочем баке.

По заполнении формы давление в питающем устройстве снимается, и поступление шликера из рабочего бака продолжается.

Для автоматической регулировки скорости поступления шликера в цилиндр питающего устройства в конструкции предусмотрен поплавковый клапан *5*, который по мере поднятия уровня шликера в цилиндре уменьшает величину входного сечения и, следовательно, скорость поступления шликера.

Приведенное на фиг. 52,*д* питающее устройство мембранного типа применяется в случаях использования форм, неподвижно закрепленных на столе литейной машины. В этом случае не форма прижимается к питающему устройству, а питающая труба, подвешенная на резиновой мембране, с помощью сжатого воздуха подымается мембраной вверх и присоединяется к литниковому отверстию формы.

На фиг. 52,*е* представлен один из вариантов конструкций питающих устройств, не требующих наличия герметизированного рабочего бака.

Действие устройства заключается в следующем.

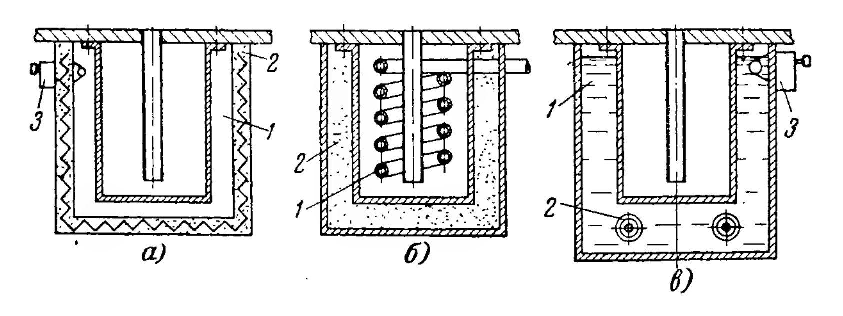
Под давлением гидростатического давления шликера, находящегося в рабочей емкости, действующего на шарики *4*, последние приподнимаются, и шликер заполняет цилиндр *1*. Сжатый воздух, поступая в трубу *3*, давит на шликер, находящийся в цилиндре *1*, и заставляет шликер подниматься под давлением по трубе *2* и заполнять форму, установленную на фланце трубы *2*. Обратному движению шликера в рабочую емкость препятствуют шарики *4* под давлением собственного веса и давления шликера, плотно запирающие входные отверстия. По окончании процесса заполнения формы давление сбрасывается, и цикл повторяется сначала.

Экспериментальная проверка показала, что основным недостатком устройства является засорение клапанов (шариковых) шликером с уменьшенным количеством связки после 140—160 циклов работы. Причиной появления шликера с уменьшенным количеством связки является сепарация связки под давлением воздуха через небольшой, но неизбежный зазор между шариком и гнездом.

Испытание целого ряда других различных вариантов конструкций клапанных питающих устройств приводило

к такому же результату. Поэтому такие устройства не могут быть пока рекомендованы для применения на производстве.

Нагреватели служат для разогрева литейного шликера до определенной температуры (60 ÷ 90°) в рабочем баке и на выходе из питающего устройства. Обычно в баке устанавливаются два нагревателя: один для разогрева собственно бака (рабочей емкости) и другой для плавления литейного шликера на выходе питающего устройства.



Фиг. 53. Типовые конструктивные решения нагревателей бака.

а — электрообогрев: *1* — камера термостата; *2* — нихромовая спираль; *3* — терморегулятор; *б* — с масляным и водяным обогревом: *1* — змеевик с циркулирующим нагретым маслом; *2* — термоизоляция; *в* — электрообогрев с масляной или водяной баней: *1* — масляная рубашка; *2* — нагреватели; *3* — терморегулятор.

Для разогрева бака применяются масляные, водяные (паровые) и электрические нагреватели, а для плавления шликера на выходе питающего устройства, как правило, электрические (фиг. 52). Типовые конструктивные решения нагревателей бака приведены на фиг. 53.

Термостат с терморегулятором служит для поддержания постоянной температуры литейного шликера и является основанием для сборки узла бака.

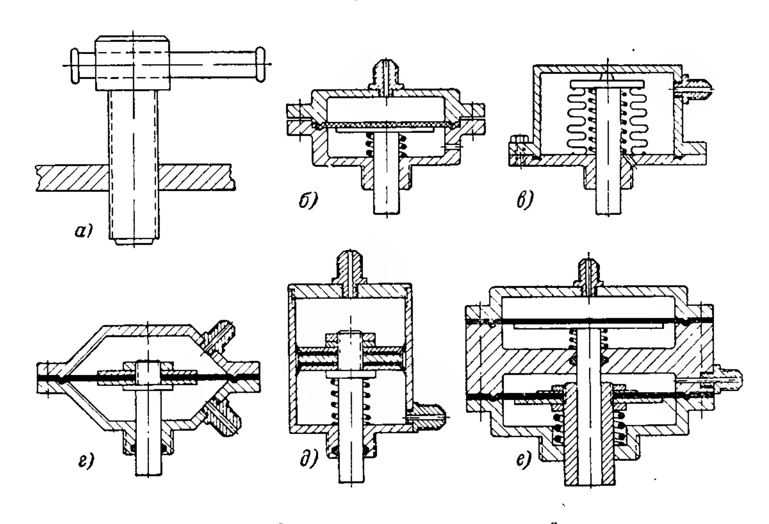
Термостат выполняется в виде камеры со стенками, снабженными надежной термоизоляцией.

Терморегулятор, обычно дилатометрический, монтируется либо в камере термостата, либо в сети водяного обогрева и обеспечивает автоматическую регулировку температуры за счет периодического включения и выключения нагревателей.

В целях уменьшения колебания температуры в рабочем баке в термостате устанавливается ванна с водой или маслом, в которую помещается нижняя часть рабочего бака.

Прижимное устройство служит для удержания формы на рабочем столе во время заливки ее литейным шликером. Прижимные устройства по принципу действия подразделяются на механические, пневматические и гидравлические.

Наибольшее применение получили механические и пневматические устройства, так как они не требуют дополнительных специальных коммуникаций (фиг. 54).



Фиг. 54. Схемы прижимных устройств.

а — винтовое; *б* — мембранное; *в* — сильфонное; *г* — мембранное двустороннего действия для стационарных форм; *д* — поршневое; *е* — двойного действия, мембранное, для безлитникового литья.

Винтовой прижим (фиг. 54,*а*) применяется главным образом в случаях отливки крупных изделий.

Мембранный, сильфонный и поршневой прижимы (фиг. 54,*б*—*е*) применяются в подавляющем большинстве случаев. В зависимости от типа формы для литья (ручная, безлитниковая, стационарная) выбирается та или иная конструкция прижимного устройства.

Следует отметить, что во всех случаях, когда это возможно, следует отдавать предпочтение мембранным и сильфонным прижимам, так как они обеспечивают наименьший расход воздуха и весьма надежны в работе.

Прижимное устройство монтируется на рабочей плите машины таким образом, чтобы ось штыря прижима совпадала с осью отверстия питающего устройства.

Для обеспечения возможности применения литейных форм различной высоты прижим должен иметь вертикальное перемещение. С этой целью обычно прижим крепится на траверзе, которая может перемещаться по двум стойкам и закрепляться на заданной высоте.

Стойки изготовляются гладкими, цилиндрическими с креплением траверзы зажимами или резьбовыми с гайками, между которыми зажимается траверза, а также на литом кронштейне и т. п.

Наиболее удобными в производстве для наладки являются резьбовые стойки с гайками.

Станина, или рабочий стол, служит для монтажа всех узлов машины ЛПГ.

Станина может быть сварной или литой. На станине монтируются термостатический бак с прижимным устройством и узел управления.

Как правило, непосредственно на станине крепятся воздушные клапаны и ножные педали для их включения и выключения.

Пульт управления представляет собой панель, на которой смонтированы все основные рукоятки управления и контрольно-измерительные приборы.

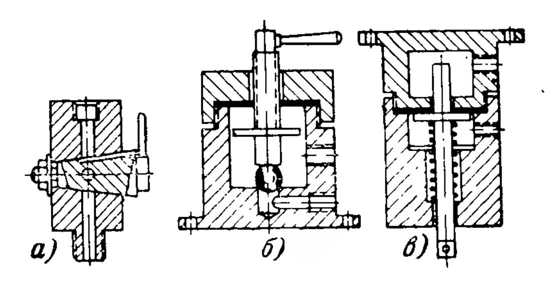
На пульт управления устанавливаются выключатели (для обогревателей), воздушный кран, водяной кран, гальванометр с переключателем (или другой тип измерителя температур, например логометр, манометрический термометр и т. п.), манометр, реле времени или часы, вакуумметр (в случае вакуумирования литейного шликера непосредственно на ЛПГ).

В конструкции узла управления полуавтомата существенным является выбор конструкции воздушного крана (остальные устройства являются типовыми).

В настоящее время применяются и проверены три основных конструктивных варианта кранов, схемы которых приведены на фиг. 55, из которых наиболее приемлемыми в результате проверки оказались краны, показанные на фиг. 55,*б*, *в*, обеспечивающие наименьшие потери сжатого воздуха и наиболее надежные в работе.

Общий вид одного из наиболее широко применяемых вариантов конструкции литейной машины типа ЛПГ приведен на фиг. 56.

Рабочий цикл на литейных машинах типа ЛПГ при работе с ручными формами осуществляется следующим образом.



Фиг. 55. Воздушные краны.

а — пробковый; *б* — шариковый; *в* — подвесной, пружинный.

Фиг. 56. Общий вид литейной машины типа ЛПГ.

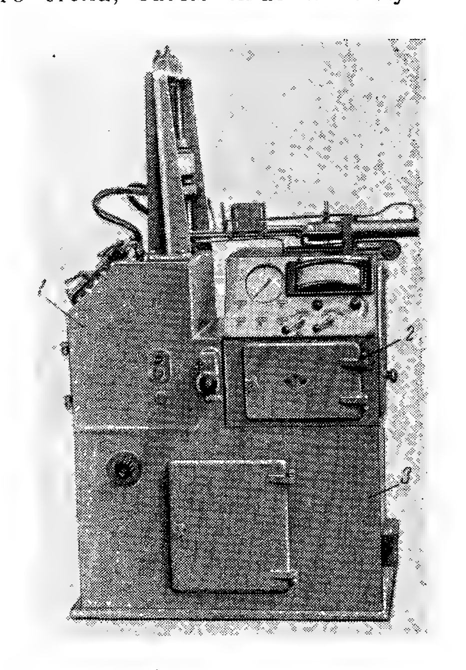
1 — станина; *2* — рабочий бак; *3* — терморегулятор; *4* — масляная баня с нагревателями; *5* — передвижная траверза; *6* — стойки с ленточной резьбой; *7* — мембранное прижимное устройство; *8* — воздушные клапаны; *9*—стержневой обогреватель; *10*, *11* — педали.

Литейная форма устанавливается на рабочую плиту таким образом, чтобы литниковое отверстие формы совпало с отверстием питающего устройства, а головка формы находилась под штоком прижима.

Нажатием на педаль *10* (фиг. 56) подается давление сжатого воздуха на прижим, который плотно прижимает форму к плоскости рабочего стола; затем сжатый воздух подается в рабочий бак путем включения педали *11*, и литейный шликер из бака по трубке питающего устройства поступает в полость формы.

По истечении времени, необходимого для заполнения формы и охлаждения залитого в нее литейного шликера, сбрасывается давление в рабочем баке (отпускается педаль), а затем в прижиме. Форма снимается со стола ЛПГ, и из нее извлекается отливка, затем цикл повторяется снова.

Для отливки изделий в условиях крупносерийного и массового производства следует применять автомат типа ЛАГ-1 (фиг. 57), обеспечивающий массовый выпуск керамических изделий из различных непластичных материалов (высоковольтных, высокочастотных, огнеупорных и т. п.).



Фиг. 57. Автомат для литья под давлением типа ЛАГ-1.

Автомат универсален и позволяет изготовлять изделия различных размеров и конфигураций.

По принципу действия автомат является пневматическим с электромагнитным управлением.

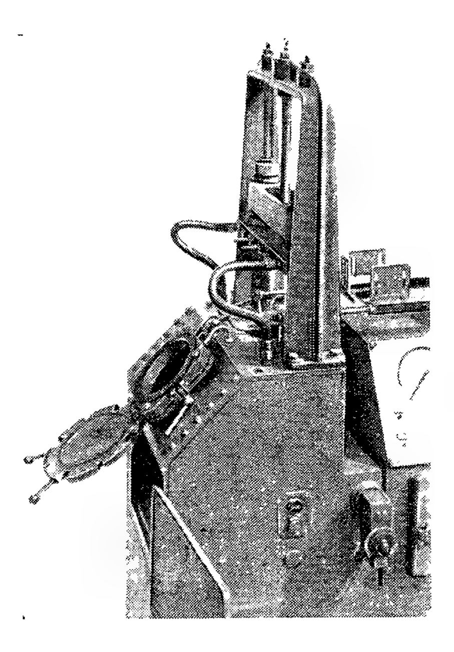
Весь рабочий цикл полностью автоматизирован; автомат требует только периодической загрузки материала.

Полная автоматизация рабочего цикла обеспечивает возможность обслуживания одним рабочим нескольких автоматов.

Техническая характеристика автомата

1. Габариты автомата, *мм*	600×1 200		
2. Максимальные габариты отливки, *мм*:			
	Ширина	Длина	Высота
для горизонтальных форм	60	60	100
для вертикальных форм	100	120	110
3. Производительность автомата, шт./час:			
при одноместной форме	100—600		
при многоместной „	до 6 000—7 000		
4. Продолжительность одного цикла, сек.	от 5 до 60		
5. Давление в воздушной сети, *атм* . . .	3—6		
6. Потребляемая мощность, *квт*	2,0		
7. Средний расход сжатого воздуха, *м³/час*	15		
8. Емкость рабочего бака, *л*	4,0		

Корпус (станина) представляет собой металлический каркас (литой или сварной), на котором монтируются все узлы автомата. Корпус состоит из трех секций. В первой помещаются рабочий бак и обогреватель. Внутри второй секции расположен распределитель, под которым в третьей секции находятся реостат и электропроводка.



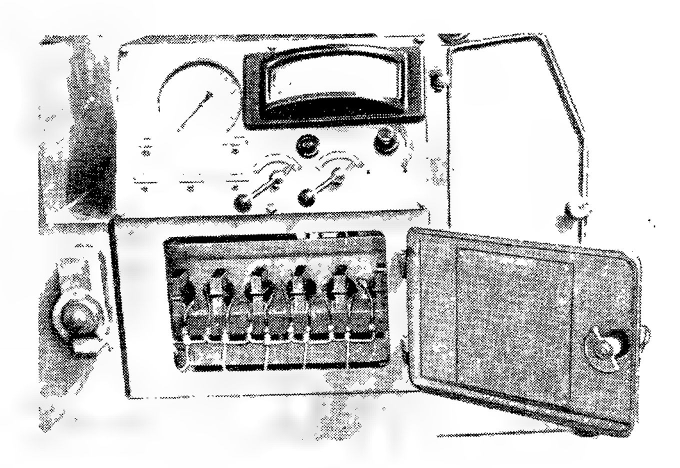
Фиг. 58. Первая секция автомата с открытой дверцей; у бака откинута крышка.

Для удобства регулирования и ремонта корпус снабжен четырьмя крышками с ручками-замками, открывающими доступ в любую секцию автомата.

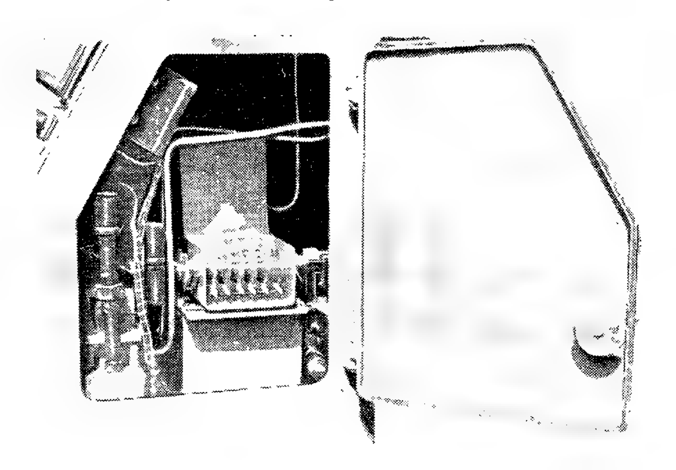
На фиг. 58—61 показаны секции автомата с открытыми дверцами.

Р а б о ч и й   б а к является емкостью для литейного шликера и представляет собой металлический (стальной) цилиндр с днищем и герметически закрывающийся крышкой с помощью болтов (фиг. 58). Бак смонтирован на станине наклонно.

В дно цилиндра вмонтирован стержневой обогревательный элемент.



Фиг. 59. Вторая секция автомата; через открытую дверцу видны электромагнитные клапаны.



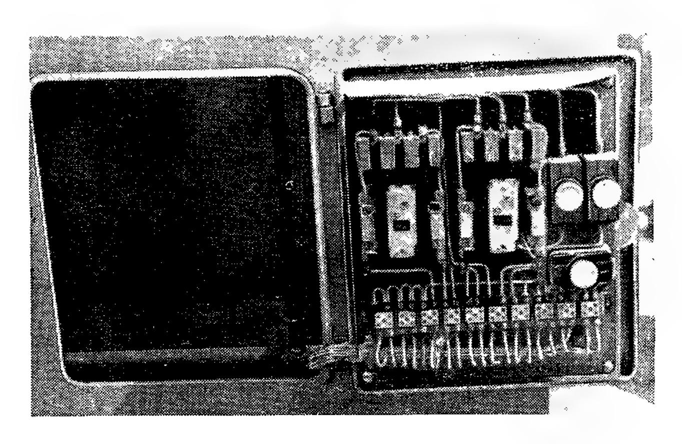
Фиг. 60. Вторая секция автомата; через открытую боковую дверцу виден кулачковый распределитель.

Питающее устройство выходит из камеры бака на верхнюю плиту станины и является сменным узлом автомата. Для отдельных групп изделий предусмотрены питающие устройства с подвижной и неподвижной питающими трубами.

Кроме того, питающие устройства применяются различных габаритов в зависимости от количества питающих точек (одноместные и многоместные).

Питающее устройство состоит из питающей трубки и резьбовой головки с соответствующим выходным отверстием (одним или несколькими). В устройстве с подвижной трубкой в головке имеется мембрана, обеспечивающая движение питающей трубки при подаче в головку сжатого воздуха.

Обогревательное устройство предназначено для поддержания необходимой температуры шликера и состоит из масляного насоса с двигателем и бачка с электроподогревом,



Фиг. 61. Третья секция автомата; на открытой дверце видны смонтированные магнитные пускатели и предохранители.

установленных в первой секции под рабочим баком, и стержневого обогревателя, установленного в рабочем баке, с реостатом, расположенным в первой секции.

Стержневой обогреватель работает от сети переменного тока напряжением 36 *в* и нагревается до температуры 100°.

На фиг. 62 ясно виден принцип работы обогревательного устройства.

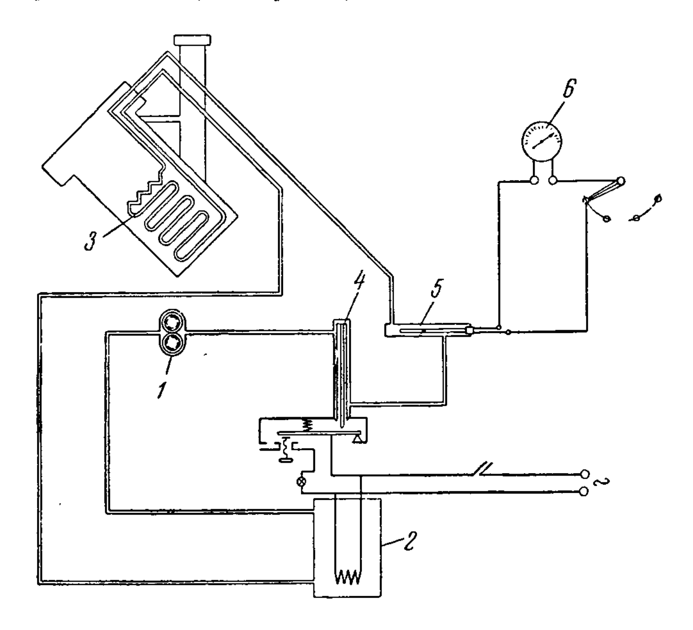
Горизонтальное пневматическое рабочее устройство служит для осуществления рабочих движений формы (смыкание и разъем с выталкиванием) при горизонтальном литье и для движения съемника при вертикальном литье.

Устройство состоит из цилиндра с поршнем и призмы с хомутом для его крепления на корпусе автомата.

Горизонтальный съемник применяется при вертикальном литье и предназначен для съема отливки и сброса ее в приемник. Съемник крепится на штоке горизонтального

поршня и состоит из планки с двумя направляющими стержнями и подпружиненного лотка.

Вертикальное пневматическое рабочее устройство служит для осуществления рабочих движений формы (смыкание и разъем с выталкиванием) при вертикальном литье и для крепления формы при горизонтальном литье.



Фиг. 62. Схема системы обогрева автомата ЛАГ-1.

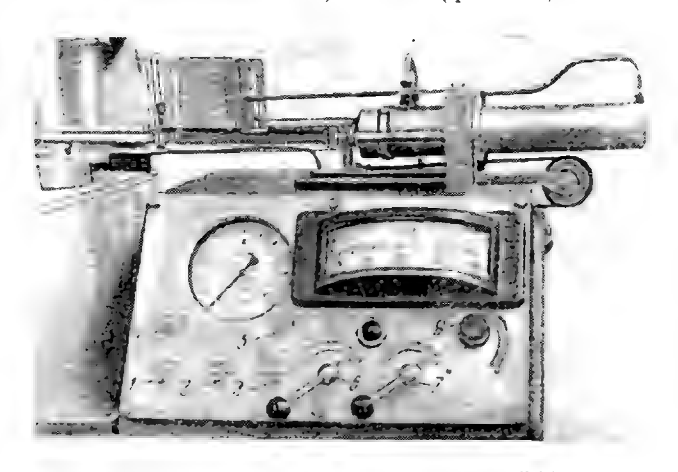
1 — масляный насос; *2* — масляный бачок с обогревателем; *3* — змеевик для обогрева рабочего бака; *4* — терморегулятор; *5* — термопара; *6* — гальванометр.

Устройство монтируется на плите станины и состоит из двух стоек с поршнем, подвижных резьбовых цилиндров с закрепленной на них траверзой и из неподвижной траверзы с упорным винтом.

Распределитель служит для регулирования и управления последовательностью рабочих движений механизма автомата по всему циклу. Состоит из воздушных клапанов шарикового типа (фиг. 59), приводимых в действие электромагнитами, и кулачкового механизма (см. фиг. 60), приводимого в движение электродвигателем с редуктором (типа Уоррена), обеспечивающего в соответствии с рабочим циклом последовательное включение и выключение электромагнитов, управляющих работой клапанов.

На пульте управления (фиг. 63), смонтированы все основные рукоятки управления и измерительная аппаратура, необходимая для контроля за режимом литья: манометр для определения давления в сети и гальванометр с переключателем для определения температуры шликера и температуры воды, охлаждающей форму.

П о р я д о к п у с к а и р а б о ч и й ц и к л а в т о м а т а. Автомат подключается к сети переменного тока 220 *в*. С помощью выключателей *1*, *2* и *3* (фиг. 63) включается



Фиг. 63. Пульт управления автомата ЛАГ-1.

3 — выключатель обогрева масла; *2* — выключатель мотора масляного насоса; *1* — выключатель стержневого обогревателя; *4* — выключатель двигателя распределителя; *5* — выключатель электромагнитов; *6* — воздушный кран; *7* — кран охлаждающей воды; *8* — переключатель гальванометра.

обогревательное устройство и рабочий бак разогревается до температуры 70—80°. В рабочий бак загружается шликер в виде цилиндрической болванки ⌀ 110—120 *мм* (или в кусках) при комнатной температуре, после чего крышка бака герметически закрывается.

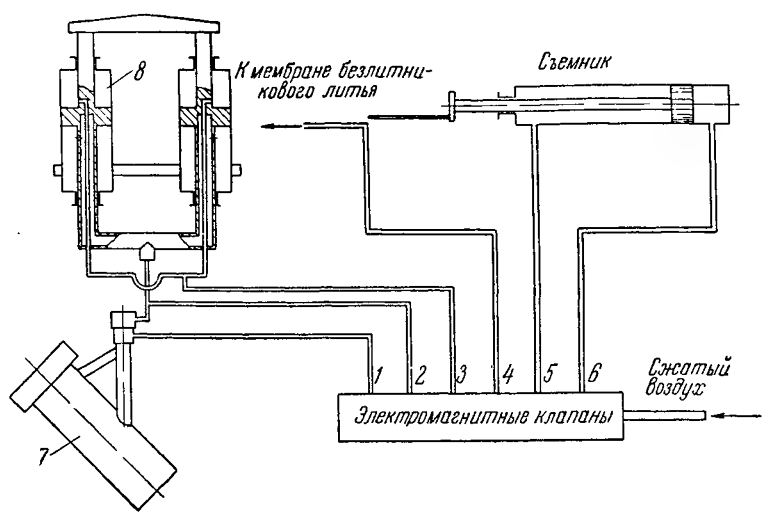
На автомат устанавливается форма для литья и к ней подсоединяется водяное охлаждение. К штуцеру автомата подводится сжатый воздух.

Первый цикл изготовления изделий для проверки проводится вручную нажимом на башмаки электромагнитов. Убедившись в правильности наладки, включают выключателем *5* электромагниты, а затем выключателем *4* двигатель распределителя. Двигатель вращает барабан с насаженными на него кулачками, которые заставляют рычаги поочe-

редно включать и выключать электромагниты, управляющие клапанами.

В зависимости от конфигурации отливаемой детали, конструкции формы и выбранной методики литья (с литником, безлитниковое литье и т. д.) рабочий цикл автомата может изменяться.

В табл. 28 приведены наиболее часто применяемые рабочие циклы. В графах, характеризующих различные рабочие циклы, приведены цифры, показывающие очередность выполнения каждого элемента цикла.



Фиг. 64. Схема разводки сжатого воздуха на автомате ЛАГ-1.
1, 2, 3, 4, 5, 6 — электромагнитные клапаны; *7* — рабочий бак; *8* — вертикальные цилиндры.

Пользуясь этой таблицей и схемой разводки сжатого воздуха, приведенной на фиг. 64, легко уяснить весь ход рабочего цикла при литье на автомате.

Время срабатывания по элементам цикла ($T_1 \div T_{15}$) устанавливается хронометражом.

Рассмотрим для примера процесс отливки при открытой вертикальной форме (1 вариант рабочего цикла): при включении клапана *1* воздух поступает в вертикальные цилиндры, несущие на себе подвижную траверзу с формой, которые в результате этого опускаются вниз и смыкают форму с питающим устройством автомата. Затем включается клапан *2*, подающий сжатый воздух в рабочий бак. При этом

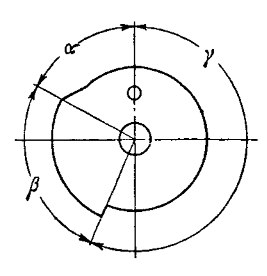
Таблица 28

№ п/п.	Наименование элементов рабочего цикла	Время срабатывания	Рабочий цикл							
			при открытой вертикальной форме	№ кулачков	при закрытой вертикальной форме	№ кулачков	при безлитниковом литье	№ кулачков	при горизонтальном литье	№ кулачков
1	Смыкание формы	T_1	1	I	1	I	1	I	1	V
2	Прижим питающего устройства . .	T_2	—	—	2	I	2	I	2	III
3	Подача шликера и выдержка .	T_3	2	II	3	II	3	I	3	II
4	Мембрана безлитникового литья	T_4	—	—	—	—	4	III	—	—
5	Сброс давления со шликера . .	T_5	3	II	4	II	5	II	4	II
6	То же с прижима питающего устройства . .	T_6	—	—	5	I	6	I	5	III
7	Сброс давления с мембраны безлитникового литья . . .	T_7	—	—	—	—	7	III	—	—
8	Сброс давления со смыкания формы . . .	T_8	4	I	6	I	8	I	6	V
9	Разъем формы .	T_9	5	IV	7	IV	9	IV	7	VI
10	Подвод съемника	T_{10}	6	V	8	V	10	V	—	—
11	Сброс давления с подвода съемника	T_{11}	7	V	9	V	11	V	—	—
12	Отвод съемника	T_{12}	8	VI	10	VI	12	VI	—	—
13	Сброс давления с отвода съемника	T_{13}	9	VI	11	VI	13	VI	—	—
14	Сброс давления с разъема формы	T_{14}	10	IV	12	IV	14	IV	8	VI
15	Пауза	T_{15}	11	—	13	—	15	—	9	—

шликер под давлением сжатого воздуха поднимется по трубе питающего устройства и заполнит форму. В этом положении дается выдержка по времени, необходимая для охлаждения шликера в форме. По окончании процесса отвердевания шликера в форме клапаном *2* осуществляется сброс давления со шликера, а клапаном *1* — сброс давления в цилиндрах, прижимающих форму. После этого включает-

ся клапан 4, подающий воздух в вертикальные цилиндры для их подъема вверх вместе с формой.

При подъеме формы вверх одновременно осуществляется выталкивание отливки из формы. Синхронно с клапаном 4 включается клапан 5, осуществляющий подачу воздуха в горизонтальный цилиндр съемника, который в момент подъема формы подходит под нее для принятия вытолкнутой из формы отливки. Затем клапаном 5 осуществляется сброс давления, а клапан 6 подает давление в горизонтальный цилиндр для возврата съемника в исходное положение. При обратном ходе съемника отливка сталкивается с лотка съемника в приемник или на ленточный транспортер. После небольшой паузы цикл повторяется сначала.



Фиг. 65. Кулачок распределителя.

Управление работой клапанов осуществляется кулачковым распределителем, у которого один оборот валика с кулачками соответствует полному рабочему циклу. В зависимости от общей длительности цикла, размеров отливки и характера рабочего цикла кулачки распределителя должны иметь определенный профиль (фиг. 65). Расчет профиля кулачков производится по ниже приведенным формулам:

для I кулачка

$$\alpha_1 = \frac{T_{15}}{t} 360^\circ, \quad \beta_1 = \frac{T_2 - t_3 + t_в}{t} 360^\circ, \quad \gamma_1 = 360^\circ - (\alpha_1 + \beta_1);$$

для II кулачка

$$\alpha_2 = \frac{T_{15} + T_2}{t} 360^\circ, \quad \beta_2 = \frac{t_3 + t_в}{t} 360^\circ, \quad \gamma_2 = 360^\circ - (\alpha_2 + \beta_2);$$

для III кулачка

$$\alpha_3 = \frac{T_{15} + T_2 + t_3}{t} 360^\circ, \quad \beta_3 = \frac{t_в - T_5}{t} 360^\circ, \quad \gamma_3 = 360^\circ - (\alpha_3 + \beta_3);$$

для IV кулачка

$$\alpha_4 = \alpha_1 + \beta_1 - \frac{T_4 + T_5}{t} 360^\circ, \quad \beta_4 = \frac{T_4 + T_5}{t} 360^\circ,$$

$$\gamma_4 = 360^\circ - (\alpha_4 + \beta_4);$$

для V кулачка

$$\alpha_5 = \alpha_4 + \beta_4 + \frac{T_8}{t} 360^\circ, \quad \beta_5 = \frac{t_c + T_{10} + T_{14}}{t} 360^\circ,$$

$$\gamma_5 = 360^\circ - (\alpha_5 + \beta_5);$$

для VI кулачка

$$\alpha_6 = \alpha_5 + \frac{t_c}{t} 360^\circ, \quad \beta_6 = \frac{T_0}{t} 360^\circ, \quad \gamma_6 = 360^\circ - (\alpha_6 + \beta_6),$$

где t — полное время рабочего цикла, сек.;

t_3 — разрыв по времени между включением мембранного питателя и давления на шликер;

$t_в$ — время выдержки, сек.; $t_3 + t_в = T_3$;

t_c — время синхронизации движения съемника с движением вертикальных цилиндров.

4. ФОРМЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Одним из узловых вопросов рационального использования способа литья под давлением (далее будем сокращенно писать ЛПД) является правильный выбор конструкции формы (кокиля) для литья.

Форма (кокиль) для литья под давлением представляет собой разъемную металлическую конструкцию, внутренняя полость которой является негативным отображением конфигурации изготовляемого изделия (полуфабриката).

Размеры этой внутренней конфигурации формы устанавливаются на основе рабочего чертежа на изготовляемое керамическое изделие с учетом огневых усадок для данного керамического материала.

Широкий ассортимент керамических изделий, изготовляемых способом ЛПД, наличие различных типов оборудования для ЛПД и т. д. вызвали разработку целого ряда принципиальных конструктивных решений форм для литья и привели к необходимости создания основ проектирования форм для ЛПД, обеспечивающих правильный выбор конструкции формы применительно к конкретным условиям производства. Правильный выбор конструкции формы должен обеспечивать получение отливки с четкой и законченной конфигурацией. Даже при правильном выборе режимов литья неудачная конструкция формы может привести к появлению ряда дефектов у отливки: недоливам, складкам, скруглению острых кромок и т. п. Эти дефекты, как правило, являются результатом отсутствия или неправильного выбора расположения вентиляционных каналов и результатом неправильного выбора литниковой системы.

Требование высокого качества отливки (структуры полуфабриката) предполагает отсутствие в отливке внутренних дефектов — раковин, рыхлот. Появление

этих дефектов может иметь место в результате неправильного выбора конструкции формы, в частности, системы охлаждения и литниковой системы.

Получение детали с заданными размерами и необходимой точности должно обеспечиваться правильным расчетом рабочих размеров формы и рациональным выбором точности изготовления формы.

Удобство в разборке и сборке формы при работе, в выемке детали из формы, простой установке формы на литейном агрегате и т. д. являются также обязательными требованиями, предъявляемыми к форме и определяющими ее пригодность для использования, особенно при серийном и массовом производстве.

Требование соблюдения экономичности определяет целый ряд конструктивных особенностей формы в зависимости от характера производства (массовое, серийное, опытное). Экономичность формы характеризуется стоимостью эксплуатации формы, включая ее себестоимость, отнесенной на единицу продукции.

В зависимости от назначения, применяемого оборудования и конструктивных особенностей формы подразделяются на следующие группы:

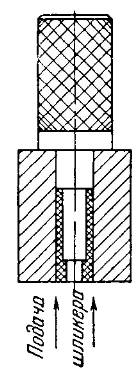
Основной признак подразделения	Группа	Отличительный признак группы
По применяемому оборудованию	1	Для литейного аппарата ручные
	2	Для полуавтомата и автомата (стационарные)
По расположению отливки	3	Горизонтальное
	4	Вертикальное
По принципу действия	5	Литье с приливами
	6	Литье без приливов
По количеству гнезд	7	Одноместные
	8	Многоместные
По методу охлаждения	9	Воздушное охлаждение
	10	Жидкостное охлаждение
По расположению плоскостей разъема корпуса формы	11	Перпендикулярно оси изделия
	12	Параллельно оси изделия
	13	Смешанные плоскости разъема
	14	Неразъемные корпуса

Различные сочетания отличительных особенностей каждой группы в конструкции одной формы обусловливают возможность наличия целого ряда типов форм.

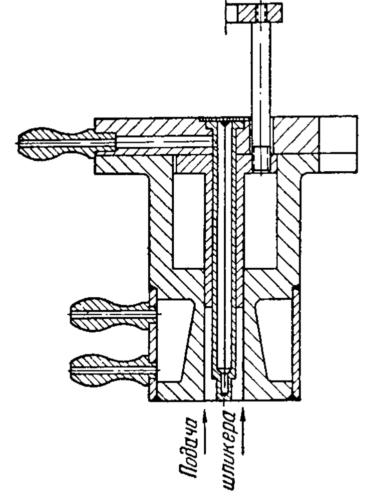
Выбор конструкции формы производится в зависимости от конфигурации детали и характера производства.

Формы 1-й и 2-й групп отличаются друг от друга системой выемки детали из формы и методикой крепления на оборудовании (фиг. 66 и 67).

Стационарные формы для полуавтомата и автомата (2-я группа) снаб-



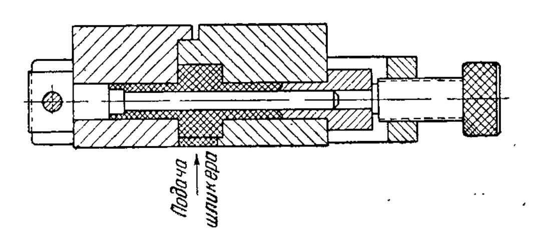
Фиг. 66. Ручная форма.



Фиг. 67. Стационарная форма.

жены механическим выталкивателем и имеют посадочные места для неподвижного закрепления формы на станке.

У форм первой группы предусматривается ручная разборка и выемка детали и отсутствуют узлы для закрепления формы на станке.

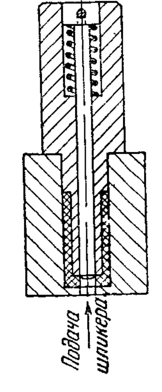


Фиг. 68. Горизонтальная форма.

Конструкции форм 3-й и 4-й групп отличаются расположением детали в форме. Горизонтальные формы (фиг. 68) в отличие от вертикальных (фиг. 66) снабжаются дополни-

тельным замком для скрепления разъемных частей формы. Одним из существенных конструктивных отличий горизонтальных форм от вертикальных является расположение литника в первом случае перпендикулярно оси изделия, во втором — параллельно оси изделия.

Принципиальное отличие форм 5-й группы (фиг. 66, 67, 68) от форм 6-й группы (фиг. 69) для безлитникового литья [Л. 18] заключается в том, что формы 6-й группы обеспечивают получение отливки законченной конфигурации, не требующей никакой доработки.



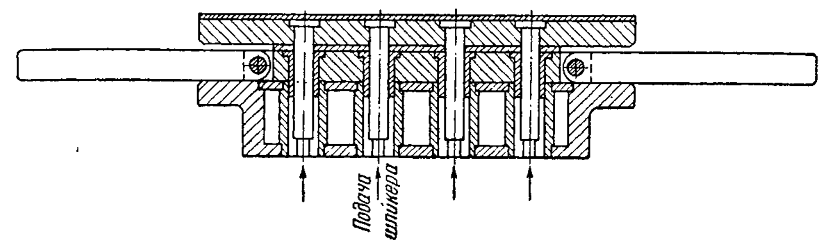
Фиг. 69. Форма для безлитникового литья.

Конструкция формы для получения отливки без прилива (безлитникового литья) основана на перекрытии литникового отверстия после полного заполнения формы шликером и частичного его охлаждения (верхней части).

Отличительной конструктивной особенностью в связи с этим является наличие подпружиненного перемещающегося стержня, перекрывающего литниковое отверстие после заливки формы.

Конструкции одноместной и многоместной форм (7-я и 8-я группы) отличаются только количеством гнезд и конструкцией литниковой системы (фиг. 67 и 70).

Конструкции форм 9-й и 10-й групп с воздушным (фиг. 66) и жидкостным охлаждением (фиг. 67) отличают-



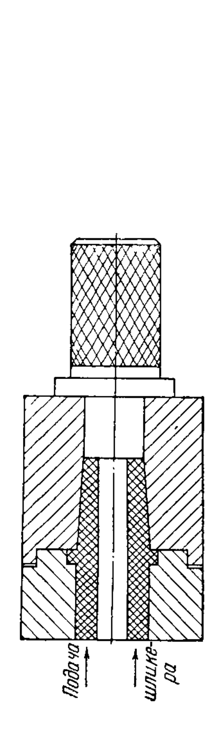
Фиг. 70. Многоместная форма.

ся друг от друга только наличием дополнительных камер для циркуляции охлаждающей жидкости у форм 10-й группы и несколько увеличенными в связи с этим габаритами.

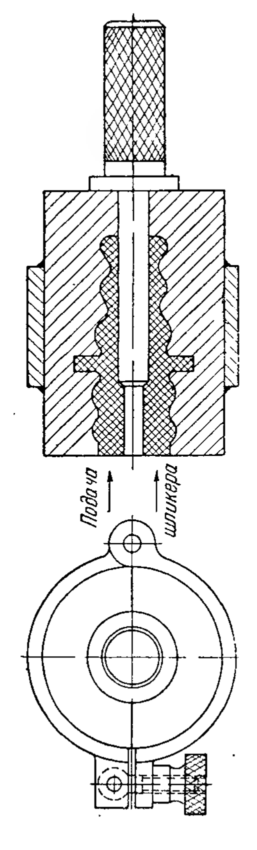
Формы 11-й, 12-й, 13-й и 14-й групп отличаются различным расположением плоскостей разъема корпуса формы.

Расположение плоскости (или плоскостей) разъема корпуса формы в основном зависит от конфигурации изделия.

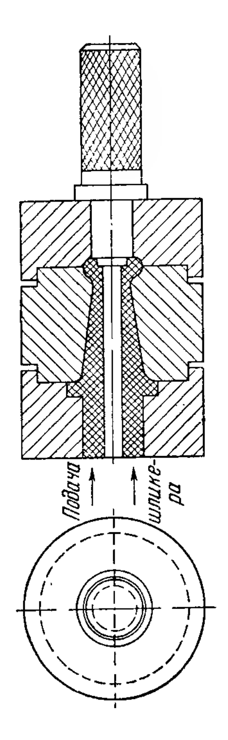
При выборе плоскостей разъема во всех возможных случаях следует отдавать предпочтение неразъемным кор-



Фиг. 71. Форма с плоскостью разъема, перпендикулярной оси изделия.



Фиг. 72. Форма с плоскостью разъема, проходящей через ось изделия.



Фиг. 73. Форма со смешанными плоскостями разъема.

пусам (фиг. 66) и разъему в плоскости, перпендикулярной оси изделия и совпадающей с одной из плоскостей изделия (фиг. 71).

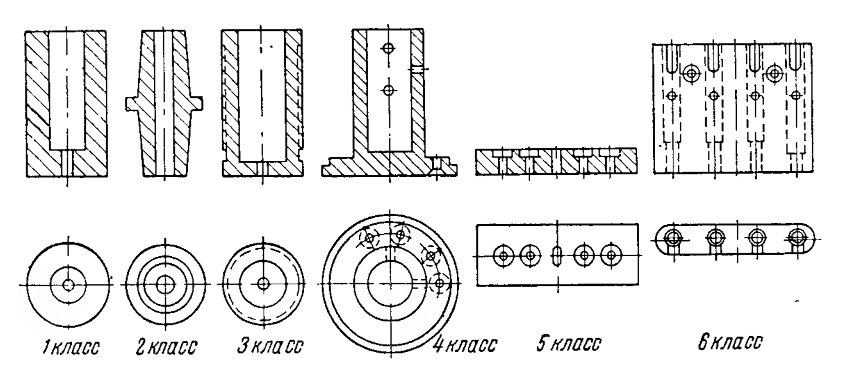
Разъем в плоскости, совпадающей с осью изделия (фиг. 72), менее желателен в связи с тем, что на поверх-

ности изделия получается два небольших продольных следа по месту стыка двух половинок формы.

Однако для изделия типа, приведенного на фиг. 72, и многих резьбовых изделий такая плоскость разъема является единственно возможной.

Для форм с плоскостью разъема параллельной оси изделия обязательно наличие замка для скрепления двух половин формы.

При наличии смешанных (сочетание перпендикулярной и параллельной плоскостей) плоскостей разъема формы (фиг. 73) роль замка обычно выполняется деталями кор-



Фиг. 74. Типовые конфигурации керамических деталей.

пуса, имеющими перпендикулярную оси изделия плоскость разъема.

Конструкция формы выбирается в зависимости от конфигурации и размеров детали.

К малогабаритным изделиям относятся детали с толщиной стенки до 10—12 *мм* и габаритами до 50 × 50 × 150 *мм*, к среднегабаритным — детали с толщиной черепка от 10 до 30 *мм* и габаритами до 200 × 200 × 400 *мм*. Изделия с большей толщиной черепка и больших габаритов относятся к категории крупногабаритных.

Каждая из этих категорий в свою очередь объединяет ряд деталей, отличающихся по своей конфигурации, которые подразделяются на шесть классов.

Типовые примеры конфигураций деталей приведены на фиг. 74.

Конфигурация отливаемой детали с точки зрения выбора типа формы в основном влияет на выбор расположения плоскостей разъема корпуса формы и расположение отлив-

ки в форме. Остальные отличительные признаки (группы) форм определяются характером производства (мелкосерийное, крупносерийное, массовое). В качестве общих правил выбора конструкции формы можно принять следующие положения:

а) для среднегабаритных и толстостенных изделий, как правило, применять формы с жидкостным охлаждением.

б) во всех возможных случаях выбирать простейшие плоскости разъема формы (с неразъемным корпусом и с разъемом в плоскости, перпендикулярной оси изделия).

в) во всех случаях стремиться к выбору вертикального расположения изделия в форме (горизонтальное положение выбирать только в крайних случаях), так как при горизонтальном расположении детали усложняются конструкция формы и ее разборка.

г) многоместные формы применять при большом машинном времени (при большой выдержке на аппарате для литья), и при малогабаритных деталях.

д) во всех случаях при достаточно большой серии деталей отдавать предпочтение выбору стационарной конструкции формы с жидкостным охлаждением.

Можно рекомендовать выбор форм для деталей:

1-го класса — с неразъемными корпусами (фиг. 66);

2-го класса — с разъемом корпуса в плоскости, перпендикулярной оси падения (фиг. 71);

3-го класса — с плоскостью разъема, параллельной оси изделия (фиг. 72);

4-го класса — с добавочными вставками и штырями для оформления отверстий;

5-го класса — со сблокированными стержнями для оформления отверстий;

6-го класса — со взаимно перпендикулярными вставками и стержнями.

Основными вопросами, которые нужно решать при конструировании форм для удовлетворения предъявляемых к ним требований, являются:

а) Выбор расположения и размеров литниковой системы.

б) Выбор системы и конструкции охлаждения формы.

в) Выбор и расположение воздушных каналов.

г) Выбор конструкции съемника и системы разборки формы.

д) Выбор материала для изготовления формы.

е) Выбор габаритных размеров формы.

ж) Выбор рабочих размеров формы.

Выбор расположения и размеров литниковой системы является узловым вопросом, от правильного решения которого зависит получение кондиционной отливки.

При неправильном выборе литника в полуфабрикате образуются усадочные раковины, рыхлоты и другие дефекты, являющиеся следствием усадочных явлений и отсутствия их компенсации.

Литниковые отверстия следует располагать в наиболее массивных частях (сечениях) детали. Размеры литниковых отверстий устанавливать таким образом, чтобы расстояние между поверхностями охлаждения у литника было равно или было больше на 5—10%, чем самое большое расстояние между поверхностями охлаждения у отливаемой детали.

В ряде случаев, когда обеспечение выполнения этого правила не представляется возможным, допустимо применение литниковых отверстий меньшего размера, однако при этом необходимо обеспечить, чтобы форма легко нагревалась потоком шликера в месте расположения литника и шликер отвердевал в литниковом отверстии в последнюю очередь.

Литниковые отверстия располагать таким образом, чтобы поток шликера встречал на своем пути минимальное количество препятствий (штырей и т. п.).

Высота (длина канала) литникового отверстия должна быть минимальной.

Литниковый прилив и форма сечения литника не должны мешать разборке формы и выемке детали.

Расположение литника на детали должно обеспечивать простоту и удобство срезки прилива, не нарушая при этом размеров изделия.

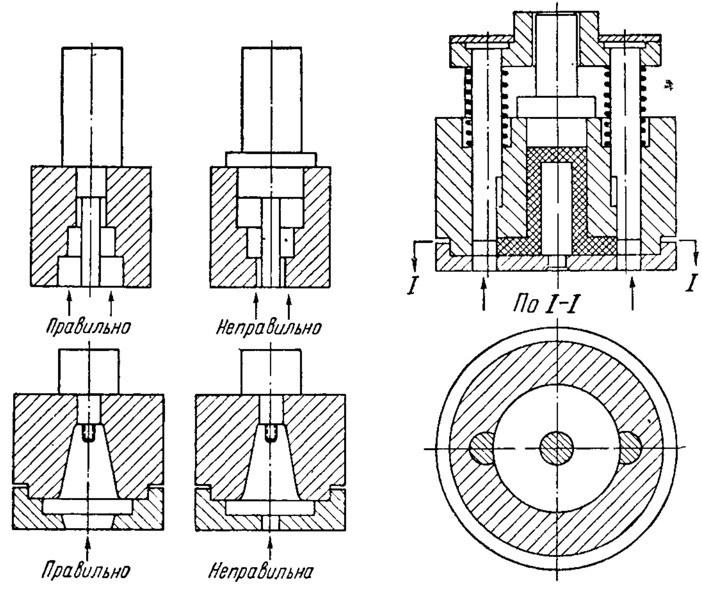
Место расположения литника должно выбираться таким образом, чтобы литниковое отверстие не нарушало рационального построения системы охлаждения.

Примеры правильного и неправильного выбора размеров и расположения литниковой системы приведены на фиг. 75.

При использовании метода безлитникового литья [Л. 18] все перечисленные правила остаются в силе. К этому следует лишь добавить, что в качестве литникового отверстия должны выбираться одно или несколько отверстий наибольшего диаметра из имеющихся в детали. В случаях использования безлитникового литья для изготовления деталей без отверстий или с отверстиями очень малого размера литни-

ковое отверстие, перекрываемое подвижным стержнем, располагается касательно к одной из поверхностей отливки (фиг. 76).

Выбор системы охлаждения (воздушное, жидкостное) производится в зависимости от характера производства и типа изделия.



Фиг. 75. Примеры выбора литниковой системы.

Фиг. 76. Форма для безлитникового литья.

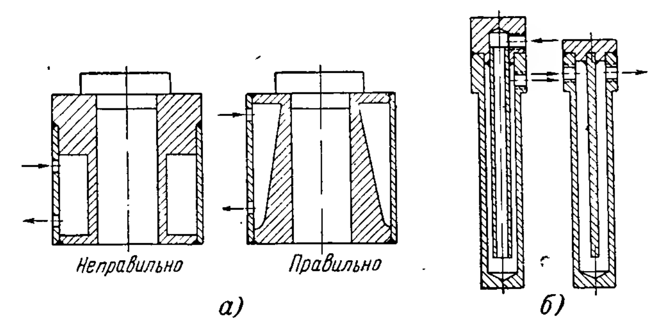
При применении воздушного охлаждения упрощается конструкция формы, но стабилизация режима работы затруднена и снижается производительность труда. Необходимая производительность труда при формах с воздушным охлаждением может быть достигнута при нахождении в обороте большого количества форм и использования их по очереди с таким расчетом, чтобы к моменту повторного использования формы последняя успела охладиться до комнатной температуры. С целью ускорения охлаждения форм можно рекомендовать применение специальных плит с циркулирующей в них водой, на которые устанавливаются для охлаждения формы.

Жидкостное охлаждение (использование циркуляции жидкости в специальной полости формы) является более надежным и эффективным способом охлаждения.

При применении жидкостного охлаждения в серийном производстве повышаются качество отливки и производительность труда, что с лихвой окупает некоторое усложнение конструкции.

Все стационарные формы для литья на полуавтомате и автомате конструируются обязательно с жидкостным охлаждением.

Расположение элементов системы охлаждения формы определяет направление охлаждения отливки в форме, что имеет существенное значение для получения качественной отливки.



Фиг. 77. Типовые решения конструкции элементов системы охлаждения.
а — охлаждение корпуса; *б* — охлаждение стержней.

Как правило, при выборе расположения элементов системы охлаждения необходимо обеспечивать направление охлаждения отливки от периферии к центру и сверху вниз, т. е. направить охлаждение так, чтобы литник застыл (отвердел) в последнюю очередь.

При конструировании системы охлаждения форм следует применять проверенные простейшие типовые решения конструкции охлаждения корпусов и штырей (фиг. 77).

Воздушные каналы в форме служат для выхода воздуха из рабочей полости формы при заполнении ее шликером. Отсутствие воздушных каналов или их неправильное расположение приводит к недоливам, так как замкнутый в полости формы воздух препятствует заполнению формы.

Для обеспечения полного удаления воздуха из формы при заливке шликера воздушные каналы должны располагаться в наивысших точках заполняемой формы и в местах резких переходов (сочетание горизонтальной и вертикальной поверхностей, глубокие канавки и т. п.).

Как правило, в качестве воздушных каналов использу-

ются зазоры в местах разъема и сочленения деталей формы. Для облегчения выхода воздуха в этих местах в ряде случаев целесообразно дополнительно делать лыски и проточки.

При выборе конструкции съемника и системы разборки формы следует учитывать, что шликер при отвердевании уменьшается в объеме (дает усадку).

Эти объемные изменения внешне проявляются в изменениях линейных размеров отливки, а также при неправильном ведении процесса литья (неверных режимах или неверной конструкции формы) в появлении внутренних пустот — раковин.

При выборе конструкции съемника и системы разборки формы основное значение имеет линейная усадка. При охлаждении шликера в форме в результате усадки отливка плотно садится на стержни и отстает от стенок формы. При наличии в форме уступов отливка плотно садится на борт уступа и т. д., т. е. усадка протекает к центру отливки.

Это обстоятельство следует учитывать при выборе конструкции съемника и устанавливать съемник с расчетом на съем со штырей, а не для выталкивания детали из формы.

В некоторых случаях формы для литья можно конструировать, не предусматривая специального съемника; так, например, для ряда малогабаритных изделий можно ограничиться съемом отливки со стержня вручную. У форм для малогабаритных изделий с большим количеством отверстий и для средних и крупногабаритных изделий, как правило, необходимо предусматривать специальные устройства для съема изделий — съемники.

Некоторые типовые конструктивные решения съемников приведены на фиг. 78.

Конструкция формы должна обеспечивать удобство, простоту и легкость разборки формы для выемки из нее отливки. Основным правилом при этом является ограничение до минимума количества составных частей (две-три части), на которые разбирается форма для выемки из нее отливки. С этой целью следует блокировать стержни, оформляющие отверстия, на объединяющем пуансонодержателе, блокировать стержень и корпус формы и т. д.

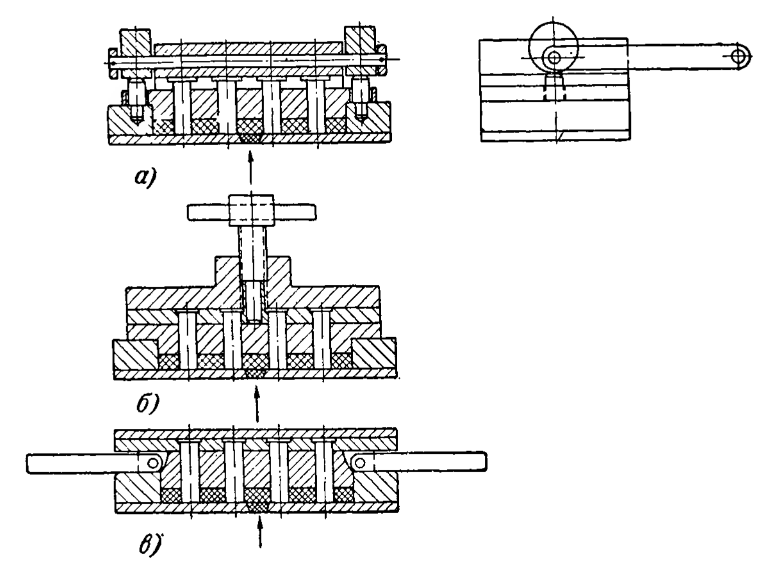
Наряду с указанным выбранная схема разборки формы должна обеспечивать удобную выемку отливки из формы.

Выбор материала для изготовления формы должен осуществляться в зависимости от размеров и типа формы и количества изделий, подлежащих изготовлению.

Для изготовления крупногабаритных форм в целях уменьшения их веса в ряде случаев целесообразно применять различные сплавы алюминия (силумин, дюралюминий и др.).

При применении стальных крупногабаритных форм необходимо предусматривать специальные грузоподъемные устройства для перемещения и разборки формы.

При изготовлении форм для выпуска небольших разовых партий малогабаритных изделий (50—200 шт.) также



Фиг. 78. Типовые конструкции съемников.
а — эксцентриковый; *б* — винтовой; *в* — рычажный.

допустимо применять легко обрабатываемые сплавы алюминия, однако при этом качество формы (износоустойчивость) будет ниже, чем в случае применения стали.

При изготовлении форм с охлаждением для серийного и массового производства, а также форм для автоматов следует применять инструментальные стали; допустимо также использование простой поделочной стали (Ст. 20, Ст. 45) с последующей термической обработкой.

Весьма целесообразно применение хромирования рабочих поверхностей формы. У форм с жидкостным охлаждением необходимо предусматривать антикоррозийные покрытия всех поверхностей, соприкасающихся с водой.

Необходимо во всех случаях предусматривать повышенную чистоту обработки рабочих поверхностей форм (шлифовку, полировку), что существенно влияет на качество поверхности отливки, так как при наличии недостаточно чистой рабочей поверхности формы на поверхности отливки появляются риски, жмотины и подобные дефекты.

Габаритные размеры формы предопределяются размерами отливаемого изделия и конструктивными элементами формы (толщина стенок, размер камеры охлаждения и т. п.).

Наряду с этим следует при выборе габаритных размеров формы придерживаться следующих основных правил:

а) Диаметр (или ширина и длина) формы должен выбираться с таким расчетом, чтобы площадь контакта нижней поверхности формы с поверхностью стола агрегата для литья была достаточной для надежного предохранения от прорыва шликера.

Практически целесообразно, чтобы наружный диаметр формы был на 18—25 *мм* больше диаметра питающего отверстия агрегата для литья.

С этой же целью, т. е. для предотвращения прорыва шликера из питающего отверстия, во избежание неправильной, нецентричной установки по отношению к питающему отверстию ручных форм на столе аппарата для литья рекомендуется на верхней плоскости формы, примыкающей к прижимному штоку (обычно на торце стержня формы), предусматривать паз с упором для центровки формы относительно питающего отверстия по прижимному штоку.

б) Высоту форм следует выбирать, придерживаясь постоянных величин с интервалом через 30 *мм*, а именно: высота формы может быть 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 *мм* и т. д.

Это правило целесообразно строго выполнять, так как наличие форм с одинаковой высотой позволяет в производстве работать одновременно на двух-трех таких формах (для различных деталей), что повышает производительность труда.

Рабочими размерами формы называются размеры внутренней полости формы, определяющей конфигурацию и размеры отливки.

Рабочие размеры формы определяются на основе рабочего чертежа на отливаемое изделие и усадочного коэффициента, установленного для материала (шликера), из которого изготовляется изделие.

До начала работы по конструированию формы необходимо разработать чертеж полуфабриката (который рекомендуется помещать на чертеже общего вида формы в правом верхнем углу) с учетом следующих положений:

а) конфигурация изделия не изменяется при обжиге (т. е. в результате усадок), и, следовательно, конфигурация полуфабриката должна соответствовать чертежу изделия;

б) все размеры изделия должны быть в полуфабрикате увеличены путем умножения на соответствующий усадочный коэффициент (угловые размеры не изменяются);

в) в чертеже полуфабриката должны быть предусмотрены необходимые припуски на дальнейшую обработку детали (механическую обработку полуфабриката и шлифовку обожженного изделия) и установлены форма, место расположения и размеры литникового прилива;

г) в чертеже полуфабриката на всех размерах, ограниченных в чертеже изделия допусками на изготовление, должны быть проставлены допуски на размеры в полуфабрикате.

В чертежах керамических изделий весьма часто встречаются допуски на размеры, нарушающие ГОСТ на допуски и посадки в машиностроении. Допуски часто проставляются произвольной величины с двусторонними отклонениями, например: $25^{\pm 0,5}$; $40^{\pm 1,0}_{\ \ 1,5}$ и т. п. В связи с этим рекомендуется все размеры и допуски на них видоизменять, приводя к односторонним отклонениям (в тело детали) путем пересчета и изменения номинала; например, $25^{\pm 0,5}$ для вала заменить на $25,5^{-1,0}$ или для отверстия на $24,5^{-1,0}$; размер $40^{\pm 1}_{\ \ 1,5}$ для вала изменить на $41^{-2,5}$, для отверстия — на $38,5^{+2,5}$ и т. д.).

Вообще же следует от конструкторов керамических деталей требовать применения нормальных (по ОСТ) размеров и простановки односторонних отклонений в соответствии с ОСТ на допуски и посадки.

Пересчет размеров изделия для определения размеров полуфабриката производится путем умножения номинального размера, а также допуска на усадочный коэффициент.

Например, размер по чертежу изделия $40^{-0,5}$ и заданный усадочный коэффициент 1,1, в чертеже полуфабриката следует поставить номинальный размер $40 \times 1,1 = 44$ с допуском $0,5 \times 1,1 = -0,55$, т. е. $44^{-0,55}$.

Припуски на дальнейшую обработку изделия прибавляются к рассчитанным размерам полуфабриката; припуски на шлифовку обожженного изделия следует прибавлять к размерам обожженного изделия с последующим пересчетом установленного размера для полуфабриката.

Выбор формы, места расположения и размеров литникового прилива следует производить в соответствии с вышеприведенными указаниями.

При разработке рабочих чертежей полуфабриката следует обращать особое внимание на использование правильно установленного усадочного коэффициента.

Правильно установленный усадочный коэффициент характеризует нижний предел (наименьшую усадку) усадки в обжиге, свойственной данному материалу (шликеру).

Известно, что огневая усадка при обжиге изделий колеблется в определенных пределах за счет неизбежных технологических погрешностей (колебания в количестве связки в шликере, колебания удельного веса минеральной части и т. д.). В связи с этим при определении усадочного коэффициента должна приниматься наименьшая (за исключением грубых выпадов) величина усадки, определяемая на значительном количестве образцов (желательно применение средней статистической величины нижнего предела, установленной на основе опыта производственного выпуска).

Таким образом, усадочный коэффициент должен обеспечивать получение изделия после обжига либо с номинальными размерами, либо с размерами меньше номинала (в пределах технологических колебаний величины усадки).

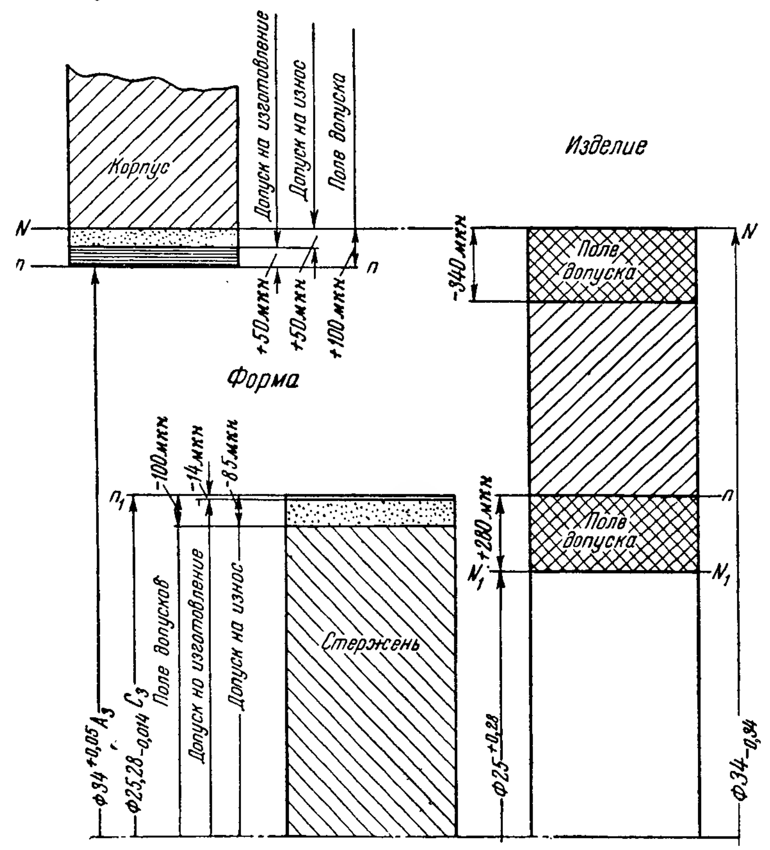
На основе разработанного в соответствии с вышеуказанным чертежа полуфабриката устанавливаются рабочие размеры формы.

За исходную величину для расчета размера формы следует принимать максимальный размер изделия с учетом допустимых отклонений (так, например, при размере вала $40^{-0,5}$ за исходную величину принимать 40; при размере отверстия $40^{+0,5}$ за исходную величину принимать 40,5 и т. д.).

Допуски на изготовление и износ формы устанавливаются за счет допуска на изготовление изделия. Допуски на изготовление и износ формы не должны в сумме превышать $^1/_3$ значения допуска на изготовление изделия. Как правило, рабочие размеры формы следует обусловливать допусками не ниже 3-го класса точности.

На фиг. 79 приведены схема расположения полей допусков у изделия и формы.

При установлении допусков следует помнить, что наиболее изнашиваемой частью формы является стержень, так как отливка плотно садится на него, и, следовательно, допуск на износ у стержней необходимо предусматривать наибольший возможный (в ряде случаев за счет ужесточения допуска на его изготовление).



Фиг. 79. Схема расположения полей допусков у изделия и формы.

5. РЕЖИМЫ ЛИТЬЯ

Качество отливки (полуфабриката) характеризуется следующими основными показателями:

а) плотностью упаковки минеральных частиц в полуфабрикате $K_{уп}$;

б) однородностью структуры R;

в) наличием раковин и пустот количественно выражаемым объемом раковин и пустот в процентах к объему отливки;

г) механической прочностью;

д) точностью геометрической формы и размеров.

Перечисленные показатели, при изготовлении полуфабриката литьем под давлением зависят от ряда описанных в предыдущих главах факторов (свойств шликера, оборудования, конструкции формы) и в весьма значительной мере от режимов литья.

К числу параметров, характеризующих режим литья под давлением, относятся температуры шликера и формы, давление, скорость заполнения формы шликером, время выдержки.

В зависимости от температуры шликера изменяются его вязкость, литейная способность и усадка при охлаждении, т. е. изменяются основные показатели свойств шликера, определяющие ход процесса литья.

Наряду с этим изменение температуры шликера при постоянной температуре формы приводит к изменению скорости кристаллизации при охлаждении и, следовательно, к изменению структуры полуфабриката. Исследование влияния температуры шликера на качество отливки [1] показало, что повышение начальной температуры шликера приводит к некоторому увеличению плотности полуфабриката ($K_{уп}$), уменьшению объема внутренних раковин и пустот и уменьшению усадки отливки при охлаждении (т. е. уменьшению отклонений размеров отливки от размеров формы).

Объем внутренних раковин и пустот в отливке выражается в процентах к объему отливки. Определение объема внутренних раковин и пустот производится путем измерения объема отливки и подсчета по формуле

$$V = \frac{V_o - V_m}{V_o} \cdot 100\%.$$

Усадка (наружная) отливки при охлаждении определяется по формуле

$$\Delta V = \frac{V_ф - V_o}{V_ф} \cdot 100\%,$$

[1] Экспериментальная работа по выявлению влияния режимов литья на качество отливок выполнялась инж. Е. Г. Смажевской под руководством автора.

где ΔV — объемная усадка отливки, %;

$V_{ф}$ — объем рабочей полости формы для литья, $см^3$;

V_o — объем отливки, $см^3$;

V — объем внутренних раковин и пустот, %;

$V_т$ — теоретически возможный объем отливки, $см^3$ (при полном отсутствии раковин и пустот), вычисляемый путем деления веса отливки на объемный вес литейного шликера.

Однако одновременно с улучшением структуры отливки повышение температуры шликера приводит к локальной концентрации внутренних раковин и пустот.

Кроме того, даже небольшие погрешности в выборе конструкции формы (размеры литника, направление охлаждения и т. п.) при литье из шликеров с повышенной температурой (90—100°) приводят к резкому снижению качества отливки. Это объясняется тем, что повышение температуры шликера влечет увеличение его объемных усадок при охлаждении. Поэтому в производственных условиях целесообразно придерживаться средних значений температуры шликера — порядка 65—90°.

Значение температуры формы как параметра режима литья заключается в том, что в зависимости от температуры формы изменяется скорость охлаждения шликера и, следовательно, структура отливки. Кроме того, от температуры формы зависит время, необходимое для отвердевания шликера.

Экспериментальное исследование влияния температуры формы показало, что качество отливки повышается при понижении температуры формы.

Повышение температуры формы (от 0 до 40°) приводит к увеличению объема внутренних раковин и пустот и уменьшению усадки отливки.

Следовательно, с точки зрения качества отливки целесообразно выбирать при литье минимальную температуру формы. Однако при отливке тонкостенных изделий и изделий сложной конфигурации чрезмерно низкая температура формы может привести к недоливам вследствие большой скорости охлаждения шликера, а также к трещинам вследствие переохлаждения отливки, усадке которой противодействуют элементы формы (стержни, оформляющие отверстия, и т. п.).

В связи с этим температура формы должна выбираться наинизшей, но с учетом конфигурации и размеров отливки.

Весьма существенным параметром режима литья под давлением является величина давления. В зависимости от величины давления при литье изменяется скорость заполнения формы, интенсивность компенсации усадочных явлений при охлаждении шликера в форме и условия процесса кристаллизации.

При изучении влияния давления на качество отливки, в целях установления влияния собственно давления, скорость заполнения соблюдалась постоянной (путем применения постоянного давления при заполнении формы, а затем повышения или понижения давления до заданного значения). В результате проведенных исследований установлено, что увеличение давления при литье до 5,0 *ат* несколько повышает плотность полуфабриката ($K_{уп}$) за счет уменьшения объема внутренних раковин и пустот. Повышение давления выше 5 *ат* (до 15 *ат*) не оказывает существенного влияния на качество отливки. Усадка отливки (при охлаждении) уменьшается при повышении давления.

Скорость заполнения формы шликером как параметр режима литья определяет возможность полноценного заполнения формы (без недоливов, неслитин и подобных дефектов). Кроме того, в зависимости от скорости заполнения изменяется характер потока шликера, что может сказаться на структуре отливки. Так, например, чрезмерно большая скорость заполнения может привести к завихрениям потока и захвату воздуха в тело отливки. Экспериментальное исследование влияния скорости заполнения, которая изменялась в пределах от 25 *см³/сек* до 200 *см³/сек*, на качество отливки показало, что при увеличении скорости заполнения несколько изменяется объем внутренних раковин и пустот в сторону увеличения при существенном повышении скорости заполнения. Остальные показатели качества отливки не зависят от скорости заполнения.

Время выдержки при литье под давлением определяет производительность процесса и в определенной мере влияет на качество отливки. Время выдержки является величиной, зависящей от свойств шликера, температурного режима процесса литья и размеров отливки.

Время выдержки увеличивается при низкой теплопроводности шликера (высокой литейной способности), повышении температуры шликера и формы и при увеличении толщины отливки.

Выбор времени выдержки может производиться путем

расчета на основе экспериментально построенных номограмм и путем подбора.

Последний путь, несмотря на примитивность, является наиболее удобным в производственных условиях. При выборе времени выдержки необходимо добиваться получения полностью отвердевшей отливки. При этом нельзя допускать чрезмерно большой выдержки, так как вследствие излишнего охлаждения и усадки отливки при этом возможно возникновение дефектов в отливке. Время выдержки должно быть необходимым и достаточным для отвердевания всего объема отливки. Простейшим приемом при выборе времени выдержки является контроль за застыванием шликера в литниковом отверстии (время выдержки постепенно увеличивается до момента застывания шликера в литнике.

Учитывая влияние отдельных параметров режима литья на качество отливки, выбор режимов литья может производиться на основе следующих правил:

а) Температура шликера должна выбираться достаточной для полноценного заполнения формы и находиться в пределах 65—90°.

б) Температура формы должна соблюдаться постоянной и находиться в пределах 10—25° для тонкостенных изделий (до 6—7 *мм*) и 0—20° — для более толстостенных изделий.

в) Давление на шликер должно выбираться в зависимости от конфигурации изделий для обеспечения нормального заполнения формы и находиться в пределах 3—6 *ат*. Давление следует повышать для тонкостенных и высоких изделий и, наоборот, уменьшать для толстостенных.

г) Время выдержки выбирается с таким расчетом, чтобы оно обеспечило отвердевание всего объема отливаемого изделия, причем с увеличением толщины стенок изделия время выдержки увеличивается.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

УДАЛЕНИЕ СВЯЗКИ

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Процесс удаления связки является переходным этапом на пути от полуфабриката к готовому обожженному изделию. Основной задачей процесса удаления связки является подготовка полуфабриката к обжигу путем изменения свойств системы за счет уменьшения количества или полного изъятия связки из системы, или за счет такого преобразо-

вания структуры связки, при котором система теряет способность плавиться при нагревании.

В настоящее время в производстве применяются два основных способа удаления связки: полное и частичное.

Процесс удаления связки осуществляется посредством нагревания полуфабриката, помещенного в минеральный порошок (дисперсную среду), до необходимой температуры.

При полном удалении связки процесс ведется до температуры начала спекания минеральных частиц полуфабриката, при этом связка полностью выгорает (выжигается). При частичном удалении связки процесс заканчивается при относительно низких температурах (100—250° С) и в полуфабрикате остается некоторое количество связки.

Это количество связки, остающееся в полуфабрикате после частичного удаления, обеспечивает достаточную механическую прочность полуфабриката и не приводит к деформациям (плавлению) при последующем нагревании его.

При любом способе удаления связки полуфабрикат подвергается нагреву и, следовательно, все явления в течение этого процесса происходят в результате нагревания.

Как указывалось выше, литейный шликер, из которого изготовлен полуфабрикат, претерпевает объемные изменения (усадки) при отвердевании. При нагревании эти объемные изменения протекают в обратном порядке и могут быть подразделены на 4 этапа:

1. Расширение системы (шликера) при нагреве в твердом состоянии.
2. Увеличение объема системы при изменении агрегатного состояния (переход из твердого состояния в жидкое).
3. Расширение при нагревании в жидком состоянии.
4. Расширение при переходе из жидкого состояния в газообразное.

Объемные изменения на первых трех этапах по своему характеру и величине тождественны объемным изменениям при охлаждении шликера, только обратны по знаку.

Четвертый этап присущ только процессу удаления связки. Значение перечисленных объемных изменений полуфабриката весьма велико.

Эти объемные изменения определяют в большой мере результат процесса и обусловливают выбор рационального режима нагревания.

Неправильный учет влияния объемных изменений при удалении связки приводит к появлению дефектов на полуфабрикате (трещин, вздутия, расслоения и т. п.).

Для оценки влияния каждого из перечисленных этапов объемных изменений на ход процесса удаления связки необходимо рассмотреть, каким путем осуществляется удаление связки. Удаление связки идет двумя основными путями: 1) миграцией связки в окружающий порошок (дисперсную среду) в жидком состоянии и 2) испарением связки.

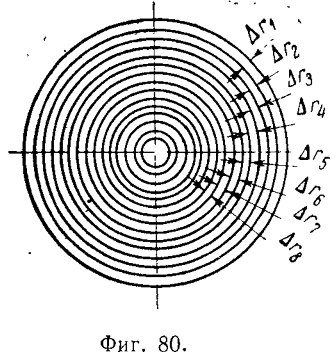
В зависимости от температуры нагрева, свойств литейного шликера и порошка-засыпки изменяется интенсивность процесса и имеет место удаление связки первым или вторым путем, или одновременно обоими.

Таким образом, механизм процесса удаления связки в общем виде можно представить как:

1) разогрев полуфабриката и расширение его в твердом состоянии;

2) переход из твердого в жидкое состояние (плавление), и дополнительное расширение полуфабриката;

3) миграция связки в жидком состоянии;



Фиг. 80.

4) дальнейший разогрев и расширение полуфабриката в жидком состоянии и одновременная миграция связки;

5) переход связки из жидкого состояния в газообразное (испарение связки);

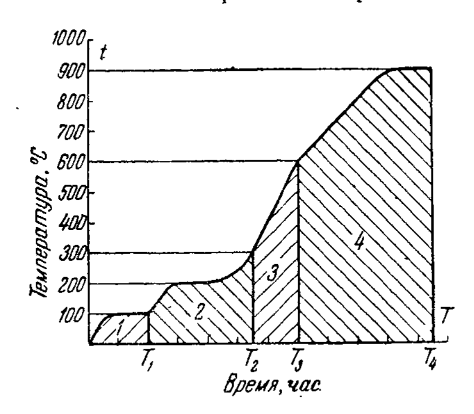
6) дальнейший нагрев и выгорание остатков связки;

7) дальнейший нагрев и начало спекания частиц порошка в точках контакта, сопровождаемое уменьшением объема полуфабриката (усадка).

Все перечисленные явления могут протекать одновременно или последовательно и с различной скоростью. В зависимости от этой очередности и скорости протекания перечисленных явлений будет изменяться результат процесса удаления связки.

Рассмотрим, что будет происходить в полуфабрикате при его разогреве. Допустим, мы имеем полуфабрикат в виде цилиндра (фиг. 80), который нагревается с очень большой скоростью. В данном случае, когда в наружном слое будет протекать, испарение связки, во внутренних слоях (Δr_5, Δr_6, Δr_7 и т. д.) будут происходить только первые этапы разогрева — переход из твердого в жидкое состояние и т. д.

Следовательно, при быстром разогреве полуфабриката в различных его слоях протекают различные явления разогрева от 1-го этапа до 7-го. Так как при этом имеют место различные объемные изменения и происходят структурные изменения полуфабриката, а разогрев идет от поверхности к центру, внутренние слои, изменяя свой объем и встречая сопротивление наружных слоев, будут разрывать наружные слои (вспучивание), и наоборот, наружные слои, уменьшаясь в объеме и встречая сопротивление со стороны внутренних, будут разрушаться (трещины).



Фиг. 81. Типовая кривая разогрева полуфабриката при удалении связки.

1 — разогрев полуфабриката до температуры плавления (80—100°) с выдержкой при температуре, достаточной для прогрева и плавления детали по всему объему; 2 — удаление легких фракций связки за счет миграции в жидком состоянии (при более низких температурах) и испарения (100 — 300°); 3 — выжигание остатков связки (300 — 600°); 4 — разогрев изделия до начала спекания (600—900°) и выдержка при конечной температуре.

То же самое может происходить за счет чрезмерно быстрого газообразования во внутренних слоях: газ, не успевая выходить через поры полуфабриката, будет его разрывать.

Следовательно, очень большая скорость разогрева полуфабриката при удалении связки недопустима. Нагревание при удалении связки должно производиться со скоростью, обеспечивающей безболезненное осуществление всех объемных изменений полуфабриката. Для этого разогрев должен идти медленнее в интервалах больших объемных изменений и несколько быстрее при малых объемных изменениях.

Основными «опасными» моментами являются переход из твердого в жидкое состояние при достижении температуры плавления и переход из жидкого в газообразное состояние.

Поэтому при температурах указанных переходов целесообразно давать выдержку для равномерного прогрева всего изделия. При этом чем больше толщина стенки изделия, тем длительнее должна быть выдержка. На фиг. 81 пред-

ставлена типовая кривая разогрева полуфабриката при удалении связки.

Приведенная кривая характеризует изменения температуры, которые должен претерпевать полуфабрикат (изделие). Для обеспечения получения такой температурной кривой на изделии температурный режим в печи должен строиться с учетом теплопроводности порошка-засыпки, толщины слоя засыпки, объема печи и т. д. и может существенно видоизменяться в части увеличения времени выдержки при каждой данной температуре. Однако основные температурные этапы кривой при этом должны сохраняться.

2. РЕЖИМЫ УДАЛЕНИЯ СВЯЗКИ

Процесс удаления связки из полуфабриката осуществляется в печах, обеспечивающих необходимую конечную температуру и возможность соблюдения заданного температурного режима (электропечи, пламенные печи и т. п.).

Для удаления связки полуфабрикаты загружаются в керамические капсели (короба) и засыпаются вокруг тонкодисперсным минеральным порошком, являющимся адсорбентом, отсасывающим связку из полуфабриката.

В качестве порошков для засыпки применяются глинозем, магнезия, тальк и другие минеральные порошки. Выбор того или иного порошка для засыпки производится в зависимости от состава минеральной части полуфабриката таким образом, чтобы порошок не реагировал с минеральной частью полуфабриката при температурах 800—900°.

Наряду с этим порошок должен обладать хорошей адсорбционой способностью.

Загруженные в порошок детали подвергаются нагреву по соответствующему режиму, выбираемому в зависимости от размеров изделия и других факторов.

При частичном удалении связки, наиболее удобном для средне- и крупногабаритных изделий, удаляется 30—40% связки, содержащейся в полуфабрикате, что является достаточным для предохранения его от плавления при обжиге.

Частичное удаление связки из изделий производится в коробах (керамических или металлических).

Загрузка изделий производится следующим образом.

На дно короба насыпается слой 2 *см* порошка-засыпки, и на него укладываются изделия и сверху засыпаются порошком так, чтобы выше верхней точки изделия имелся слой порошка высотой 3 *см*.

Детали в короба можно загружать как в горизонтальном, так и в вертикальном положениях в зависимости от их конфигурации и габаритов. Полые цилиндрические изделия загружаются в вертикальном положении отверстием вверх. Расстояние между загруженными деталями должно быть не менее 0,1 диаметра изделия и не менее 2—3 *мм*.

Малогабаритные изделия можно загружать в короба в несколько рядов с прослойкой порошка между рядами не менее 2,0 *см*.

Подготовка порошков для засыпки состоит в предварительном их прокаливании до соответствующей температуры и очистки от посторонних включений (прокаливание следует проводить не реже 1 раза на каждые 20 оборотов). Очистка производится просеиванием порошка перед его каждым употреблением через сито 144 *отв/см*^{2}.

В сушильный шкаф, разогретый до 80—100°, загружаются короба один на другой с прокладкой между ними брусков толщиной 5—7 *мм*.

Удаление связки осуществляется при нагреве изделий в коробах путем выдержки их в сушильном шкафу при 100° в течение 2—3 час. и с последующим повышением температуры до 150—200° с соответствующей выдержкой.

Выдержка в сушильном шкафу должна составлять от 4 до 24 час.

Время выдержки должно увеличиваться при уменьшении температуры и при увеличении размеров и толщины стенки изделий.

Время выдержки может уменьшаться за счет повышения температуры (до 150—200°) при изготовлении малогабаритных тонкостенных деталей, а также за счет удлинения (смягчения) режима обжига.

В результате проведения процесса нагрева из полуфабриката должно быть удалено 30—40% содержащейся в нем связки. Необходимое для этого (ориентировочно) время выдержки при различных конечных температурах и толщинах деталей приведено в табл. 29.

После выдержки в сушильном шкафу короба вынимаются и охлаждаются на воздухе до нормальной температуры (20°).

Перед выемкой деталей из коробов верхний слой порошка ссыпается путем наклонения короба. Детали вынимаются и тщательно очищаются кистью и обдувкой сжатым воздухом от приставшего к ним порошка.

Конечная температура нагрева, °С	Время выдержки в часах на конечной температуре при толщине стенки:			
	до 5 *мм*	свыше 5 *мм* до 10 *мм*	свыше 10 *мм* до 20 *мм*	свыше 20 *мм* до 40 *мм*
100	6	12	24	36
150*	4	8	18	27
180*	3	6	12	18
(см. сноску)	1	2	4	8

* Кроме указанной выдержки, время разогрева до заданной температуры должно составлять

Контроль деталей после частичного удаления связки осуществляется внешним осмотром; при этом не допускаются оплавления, вмятины, сколы. В целях контроля потерь в весе периодически две-три детали от партии, находящейся в производстве, взвешивают до и после прогрева в сушильном шкафу. Потеря в весе должна составлять не менее 4% от веса изделия.

Процесс полного удаления связки наиболее удобен для малогабаритных деталей и состоит из тех же операций, что и процесс частичного удаления связки.

Для полного удаления связки из образцов служат печи, обеспечивающие температуру нагрева до 1 000—1 200°.

Наиболее целесообразным является применение туннельных электропечей с силитовыми стержнями.

В качестве огнеупорной оснастки применяются керамические короба, изготовляемые из шамота или других огнеупорных материалов.

Загрузка изделий в короба производится так же, как в предыдущем случае.

В табл. 30 приводятся типовые режимы подъема температуры при полном удалении связки из изделий с различной толщиной стенок, изготовленных из клиноэнстатитового материала.

По окончании процесса удаления связки из изделий печь выключается. Охлажденные до температуры 150—300° короба выгружаются и охлаждаются вне печи до нормальной температуры. После этого производится разгрузка ручной выемкой деталей из коробов или с помощью специального разгрузочного устройства с выброситом.

Таблица 30

Температура, °С	Время подъема в часах до заданной температуры и выдержки при ней при толщине стенки у детали			
	до 5 *мм*	свыше 5 *мм* до 10 *мм*	свыше 10 *мм* до 20 *мм*	свыше 20 *мм* до 40 *мм*
100 подъем выдержка	0,5	0,5	0,5	0,5
200 подъем выдержка	0,5 —	2— —	3,5 —	5,0 —
300 подъем выдержка	1,5 1,5	2 2,5	2,0 3,5	3 4,5
400 подъем выдержка	1,5 —	1,5 —	2 —	3 —
500 подъем выдержка	1 —	1 —	1 —	1 —
600 подъем выдержка	0,5 —	0,5 —	0,5 —	1,0 —
700 подъем выдержка	0,5 —	0,5 —	0,5 —	1,0 —
800 подъем выдержка	0,5 —	0,5 —	0,5 —	1 —
900 подъем выдержка	1 2	1 2	1 2	2 2
Общее время в часах	11	14	17	25

Вынутые из коробов изделия очищаются от приставшей засыпки либо обдувкой сжатым воздухом при давлении 2—3 *ат*, либо промывкой проточной водой.

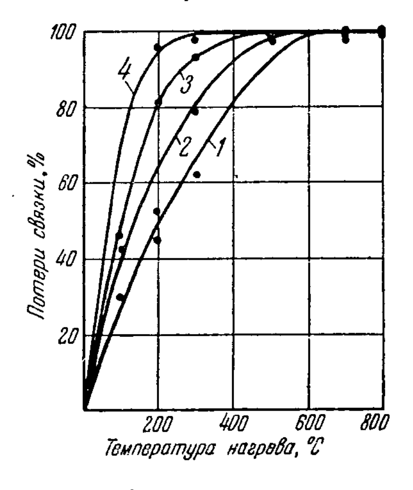
3. ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ НА ХОД ПРОЦЕССА

Повышение температуры нагрева приводит к увеличению интенсивности процесса удаления связки. На фиг. 82 приведены экспериментальные кривые[1], характеризующие влияние температуры на интенсивность процесса,

[1] Экспериментальные работы по выявлению влияния различных факторов на процесс удаления связки выполнялись инж. В. И. Гольдштейн под руководством автора.

которая выражается потерей связки в процентах к количеству связки, находившейся в полуфабрикате до нагревания.

Влияние времени выдержки на ход процесса удаления связки видно из приведенных на фиг. 83 кривых. При этом следует отметить, что потери связки при увеличении времени выдержки увеличиваются для каждой данной температуры лишь до определенного предела. Это обеспечивает стабильность технологического процесса при частичном удалении связки, так как даже излишняя выдерж-



Фиг. 82. Влияние температуры на процесс удаления связки.
1 — при выдержке 1 час; *2* — при выдержке 2 часа; *3* — при выдержке 3 часа; *4* — при выдержке 4 часа.

Фиг. 83. Влияние времени выдержки на процесс удаления связки.
1 — при температуре 80°; *2*—при температуре 100°; *3* — при температуре 200°; *4* — при температуре 300°; *5* — при температуре 500°.

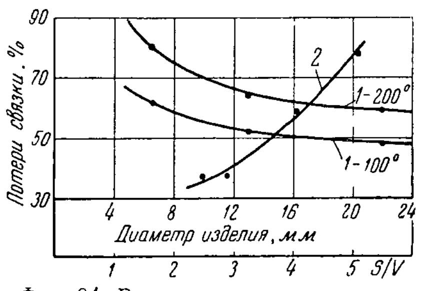
ка при постоянной температуре не меняет конечного результата процесса. Оптимальной температурой для процесса частичного удаления связки, как показали опыты, является 180°. При этой температуре обеспечиваются наивысшая механическая прочность полуфабриката (после удаления связки) и легкая его очистка от порошка-засыпки.

Размеры и конфигурация полуфабриката оказывают существенное влияние на ход процесса удаления связки при постоянном температурном режиме. На практике обычно в зависимости от размеров и конфигурации полуфабриката корректируется температурный режим и этим обеспечивается желательный результат.

Размеры и конфигурация полуфабриката оцениваются тремя показателями: толщиной стенки полуфабриката, габаритами и отношением площади поверхности S [$см^2$] к объему полуфабриката V [$см^3$].

На фиг. 84 приведены экспериментальные данные, характеризующие влияние размеров и конфигурации полуфабриката (по отношению S/V) на процесс удаления связки.

Из приведенных данных видно, что чем меньше размеры полуфабриката и чем больше отношение его поверхности к объему, тем интенсивнее идет процесс удаления связки. Следовательно, в зависимости от размеров и конфигурации полуфабриката температурный режим удаления связки должен изменяться в сторону увеличения времени выдержки при увеличении толщины стенки и уменьшении отношения S/V.



Фиг. 84. Влияние размеров и конфигурации полуфабриката на процесс удаления связки.

1 — влияние размера отливки; 2— влияние отношения S/V.

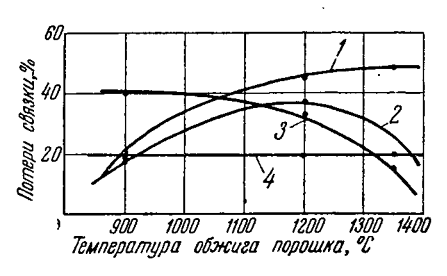
Фиг. 85. Влияние количества связки в полуфабрикате на процесс удаления связки.

Количество и состав связки, находящейся в полуфабрикате, также оказывают влияние на ход процесса. Состав связки определяет характер и прочность сцепления адсорбционных слоев с поверхностью минеральных частиц, в зависимости от чего удаление связки из полуфабриката облегчается или затрудняется. Так, например, установлено, что чем выше механическая прочность системы (полуфабриката), тем более затруднено удаление связки.

Влияние количества (концентрации) связки в полуфабрикате на процесс удаления связки видно из приведенной на фиг. 85 кривой, показывающей, что увеличение количества связки приводит к замедлению процесса. Это объясняется тем, что скорость удаления связки с единицы по-

верхности изделия при данной температуре и конфигурации изделия (отношение S/V) является величиной постоянной. Следовательно, температурный режим процесса должен удлиняться при удалении связки из полуфабриката с повышенным содержанием связки.

Состав и свойства порошка (засыпки), являющегося дисперсной средой при удалении связки, играют большую роль в процессе удаления связки. Различные минеральные порошки обладают различной теплопроводностью, что меняет характер разогрева детали даже при соблюдении постоянного режима разогрева печи, и различной адсорбционной способностью, по отношению к связке, входящей в состав полуфабриката.



Фиг. 86. Влияние состава и температуры обжига минеральных порошков, применяемых для засыпки, на процесс удаления связки.

1 — порошок глинозема; *2* — каолин; *3* — магнезия; *4* — тальк Онотский.

Адсорбционная способность порошков изменяется также в зависимости от температуры их обжига и дисперсности. На фиг. 86 приведены экспериментальные данные, характеризующие влияние состава и температуры обжига минеральных порошков, применяемых для засыпки, на процесс удаления связки.

Из приведенных данных видно, что наилучшей адсорбционной способностью обладают: глинозем, обожженный при температуре 1 200—1 350°, и магнезия, обожженная при температуре 900°.

Исследование влияния дисперсности порошка на процесс удаления связки показало, что чем выше степень дисперсности порошка, тем эффективнее протекает процесс.

Состав и свойства минеральной части полуфабриката определяют, как и состав связки, свойства системы, что в свою очередь оказывает влияние на процесс удаления связки.

Чем прочнее адсорбционная связь между компонентами системы, тем труднее и медленнее идет процесс удаления связки.

Учитывая влияние перечисленных факторов, можно ре-

комендовать следующие основные правила построения технологии удаления связки:

1) Температурный режим должен строиться на основе типовой кривой (фиг. 81) в зависимости от: а) размеров и конфигурации полуфабриката; б) количества связки, находящейся в полуфабрикате; в) свойств системы (полуфабриката); г) свойств порошка, применяемого для засыпки.

2) При увеличении толщины стенки, количества связки и механической прочности полуфабриката температурный режим должен удлиняться по времени, особенно в интервале температур 100—300°.

3) При выборе порошка для засыпки следует отдавать предпочтение тонкодисперсным порошкам, обладающим наибольшей адсорбционной способностью.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ОБЖИГ, ГЛАЗУРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

1. ОБЖИГ

Обжиг является основным этапом керамической технологии, завершающим процесс образования керамического изделия. В результате обжига, осуществляемого путем нагревания полуфабриката до соответствующей температуры, происходят спекание минеральных частиц, находящихся в полуфабрикате, и их объединение в монолитную систему — керамический материал.

При обжиге керамического полуфабриката, изготовленного горячим литьем, происходит процесс сближения минеральных частиц и вытеснения воздуха, находящегося в порах между частицами, в результате чего объем полуфабриката уменьшается до размеров готового керамического изделия.

Ввиду того, что керамический полуфабрикат состоит из минеральных частиц, представляющих собой частицы готового керамического материала, при обжиге его не имеют места такие физико-химические явления, как дегидратация, диссоциация, реакция в твердой фазе, стеклообразование, кристаллизация, модификационные превращения и т. д., влекущие дополнительные изменения объема за счет изменения структуры материала. Указанное стабилизирует ход процесса обжига и уменьшает объемные изменения (усад-

ки), протекающие при обжиге в случае изготовления полуфабриката горячим литьем.

Кроме того, температура обжига изделий при применении технологии горячего литья обычно понижается на 80—100°. Отклонения от этого общего правила являются очень редкими; например, при изготовлении изделий из TiO_2 температура спекания синтезированного материала не снижается.

Технологический процесс обжига изделий, изготовленных горячим литьем, заключается в следующем.

Изделия после удаления связки загружаются на шамотные подставки или плиты, посыпанные минеральным порошком, не реагирующим во время обжига с материалом изделий и свободным от механических примесей. Для обжига изделий из клиноэнстатитовых материалов (стеатит) в качестве подсыпки применяется кварцевый песок или тальк, для обжига корундовых материалов — глинозем и т. д.

Изделия загружаются или непосредственно на шамотные плиты или на индивидуальные подставки (бомзы).

Индивидуальные подставки изготовляются литьем под давлением из того же материала, из которого сделана деталь, и представляют собой диск или брусок с размерами, соответствующими размерам основания обжигаемой детали.

Загрузка изделий при применении индивидуальных подставок производится следующим образом: на шамотную плитку, посыпанную минеральным порошком, ставятся бомзы, которые в свою очередь посыпаются тонким слоем порошка. Полые цилиндрические образцы с дном устанавливают на плитки вверх дном. Трубчатые образцы с наружным диаметром, превышающим 25 *мм*, ставятся на плитки и сверху также покрываются диском. Стержни и трубки диаметром менее 10 *мм*, а также длинные детали при больших диаметрах (при отношении длины к диаметру, равном или большем 6) рекомендуется обжигать в подвешенном состоянии. Для обеспечения возможности подвески деталей у последних должна быть предусмотрена головка, на которой детали держатся в подвешенном состоянии в специальном трафарете с необходимым количеством отверстий.

Головка на стержнях и трубках получается либо непосредственно при отливке изделий, либо последующим намораживанием. Возможно также после удаления связки наращивать на трубку (стержень) слои исходного минерального порошка (предварительно затворенного водой).

Обжиг изделий производится по соответствующему данному материалу режиму в печах, обеспечивающих необходимую температуру и возможность регулирования.

Обжиг изделий может проводиться в пламенных печах и в электропечах с силитовыми стержнями периодического и непрерывного действия (предпочтительно в последних).

Режим обжига зависит от размеров изделий и метода удаления связки из полуфабриката. При обжиге изделий после полного удаления связки разогрев до 800—900° производится форсированно, а затем подъем температуры замедляется.

При обжиге изделий после частичного удаления связки разогрев в интервале температур 100—400° проводится медленно во избежание чрезмерно бурного испарения связки и появления дефектов на деталях.

После 400° подъем температуры производится так же, как и для деталей с полностью удаленной связкой.

Основной контроль за температурой производится с помощью термопар и гальванометров. Целесообразно, особенно при обжиге в пламенных печах, производить дополнительный контроль температуры с помощью керамических пироскопов (конусов) и проб из обжигаемого материала. Спекшиеся пробы свидетельствуют об окончании обжига.

Типовые температурные режимы обжига полуфабрикатов, подвергавшихся полному удалению связки, приведены в табл. 31, а подвергавшихся частичному удалению связки — в табл. 32.

Таблица 31

Время, часы	Температура, ° С	Время, часы	Температура, ° С	Примечание
1	300	6	950	
2	500	7	1 000	
3	700	8	1 050	
4	800	9	1 100	
5	900	10	1 150	Выдержка
		11	1 180	30 мин.

Режимы приведены для малогабаритных изделий с толщиной стенки до 10 *мм*, изготовленных из клиноэнстатитового материала.

Необходимо отметить, что конечная температура обжига может снижаться за счет увеличения времени выдержки при конечной температуре.

Таблица 32

Время, часы	Температура, °С	Время, часы	Температура, °С	Примечание
1	100	11	900	
2	150	12	950	
3	200			
4	250	13	1 000	
5	300	14	1 050	
6	350	15	1 100	
7	450			
8	600	16	1 150	
9	750			Выдержка
10	850	17	1 180	30 мин.

После обжига изделия охлаждают постепенно без резких температурных скачков во избежание появления термических трещин на изделиях.

Выборка капселей и изделий из них производится после охлаждения.

После обжига контроль внешнего вида производится в соответствии с техническими условиями на изделия.

Поверхность изделий должна быть чистой, гладкой и ровной.

Размеры изделия контролируются с помощью универсального или специального мерительного инструмента: штангенциркуля, гладких и резьбовых калибров, скоб и индикаторов.

Размеры изделия должны отвечать чертежу.

Контроль свойств изделий производится по техническим условиям на данные виды изделий. В случае отсутствия соответствующих указаний в технических условиях контроль осуществляется на стандартных образцах в соответствии с требованиями ГОСТ 5458-50 из той же партии материала, из которой изготовлены изделия.

Следует отметить, что линейные огневые усадки литых изделий, получающиеся в результате обжига, относительно невелики (6—10%). Наряду с этим в отличие от усадок при прессовании, протягивании и т. д. огневые усадки литых изделий стабильны и одинаковы во всех направлениях для изделий различной конфигурации. Эта особенность, являющаяся результатом высокой плотности и однородности упаковки минеральных частиц в полуфабрикате при горячем литье под давлением, обеспечивает при обжиге





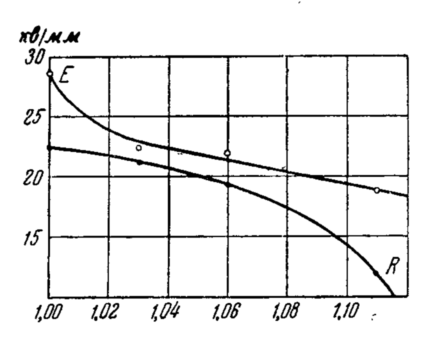
Фиг. 87. Керамические изделия, изготовленные горячим литьем под давлением.

получение изделий с высокой точностью размеров и геометрической формы.

На фиг. 87 приведены образцы изделий, изготовленных горячим литьем.

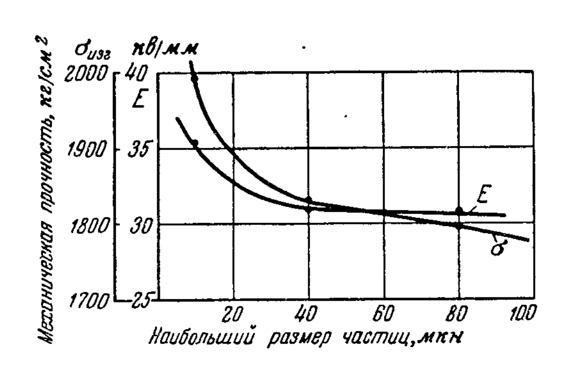
Свойства изделий, получаемых горячим литьем, соответствуют свойствам материалов, из которых изготовляются эти изделия (см. табл. 5), и зависят в определенной мере

от качества полуфабриката. На фиг. 88 приведены кривые зависимости пробивного напряжения от коэффициента неравномерности структуры полуфабриката. Пробивное напряжение, наиболее ярко отражающее влияние дефектов структуры полуфабриката на свойства изделий, как видно из диаграммы, резко падает с увеличением неравномерности структуры. Весьма существенную роль играет также дисперсность минеральной части полуфабриката. На фиг. 89 показаны зависимости механической прочности и пробивного напряжения от дисперсности минерального порошка, образующего полуфабрикат.



Фиг. 88. Зависимость пробивного напряжения от неравномерности структуры полуфабриката.

Приведенные данные характеризуют весьма большое значение качества полуфабриката с точки зрения получения высококачественных керамических изделий.



Фиг. 89. Зависимость механической прочности и пробивного напряжения от дисперсности минерального порошка.

Исходя из этого, следует стремиться к применению наиболее тонкодисперсных порошков с целью повышения свойств керамических изделий.

2. ГЛАЗУРОВАНИЕ

Глазурование изделий, изготовленных горячим литьем, производится по мере надобности путем нанесения слоя глазури на поверхность полуфабриката или обожженного изделия обычным в керамической технологии путем.

Глазурование полуфабриката после полного удаления связки осуществляется окунанием детали в разведенную водой глазурь.

При глазуровании полностью обожженных деталей глазурь (флюс) разводят на воде с добавкой по весу 0,3% глицерина, 1% очищенной соды (натрия двууглекислого) и 2% декстрина до получения суспензии необходимой плотности (порядка 1,8).

Обожженные изделия можно глазуровать окунанием, а также путем нанесения кистью. Повторный обжиг изделий, глазурованных флюсами, производится до температуры 800—950°.

Наряду с покрытием глазурью ряд керамических деталей (контурные катушки и т. п.) подвергается металлизации методом вжигания (чаще всего серебра).

Металлизация керамических изделий, изготовленных горячим литьем, осуществляется обычным для керамики путем, а потому нами особо не рассматривается.

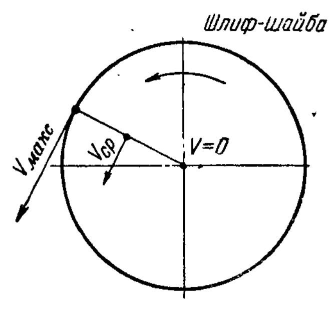
3. ОБРАБОТКА ОБОЖЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

В ряде случаев, когда требуется повышенная точность размеров или чистота поверхности, обожженные керамические изделия подвергаются дополнительной механической обработке — шлифовке.

Керамические изделия, изготовленные горячим литьем под давлением, отличаются повышенной точностью геометрической формы и размеров (порядка IV — V класса точности по ГОСТ на допуски и посадки в машиностроении), а потому в большинстве случаев не требуют шлифовки. Однако в случае необходимости обеспечения более высокой точности возникает потребность в применении шлифовки (например, для осей и т. п.). Шлифовка керамических изделий осуществляется на обычных кругло- и плоскошлифовальных станках с помощью абразивных кругов из зеленого карборунда на связке средней мягкости при обильном охлаждении. Однако наиболее широко применяется плоская шлифовка на шайбо-шлифовальных станках с незакрепленным абразивным зерном.

Наиболее широко распространены шайбо-шлифовальные станки, выпускаемые Московским заводом шлифовальных станков. Работа станка основана на том, что на вращающуюся чугунную шайбу ⌀350 ÷ 400 *мм* устанавливается диск ⌀300—320 *мм*, к которому с помощью сплава канифоли с парафином и подобных составов, приклеены шлифуемые детали. (Плоские детали относительно больших размеров 30 ÷ 50 *мм* необязательно приклеивать.) Диск прижимает детали к вращающейся чугунной шлиф-шайбе, которую поливают суспензией из воды и шлиф-порошка, и таким образом осуществляется шлифовка плоскостей деталей, прилегающих к шлиф-шайбе.

В целях получения гладкого шлифа (для перебивания штриха) диск с прикрепленными деталями приводится в колебательное движение по отношению к чугунной шлиф-шайбе и произвольно вращается вокруг своей оси вследствие трения между ним и шлиф-шайбой.



Фиг. 90.

Однако описанный метод шлифовки и станок обладают малой производительностью, недостаточной чистотой поверхности шлифуемых изделий и неодинаковой эффективностью шлифовки деталей, расположенных на поводковом диске, и вследствие этого наличием перекосов и размерного брака шлифованных деталей.

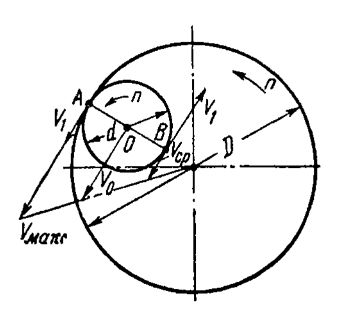
Одной из основных причин всех перечисленных дефектов является то, что на шлиф-шайбе скорости резания в различных точках имеют различные значения: на периферии скорость максимальная, а в центре равна нулю (фиг. 90).

Так как диск с прикрепленными к нему деталями лежит одновременно и на крайних точках шлиф-шайбы и на центре, то вследствие разных скоростей резания на периферии шлифовка происходит интенсивно, а в центре очень слабо. Так как диск с прикрепленными к нему деталями является жесткой системой, то шлифовка всех деталей замедляется и определяется в основном скоростью шлифовки в центре шлиф-шайбы.

Наряду с этим от центра к периферии детали сошлифовываются на конус.

Второй существенной причиной перечисленных дефектов, является недостаточное давление при шлифовании и невозможность его регулирования при шлифовке. В существующих конструкциях станков давление на 1 *см*² шлифуемой поверхности определяется весом диска и груза и составляет не более 30—40 *г/см*².

Для устранения упомянутых дефектов шлифовки необходимо обеспечить равные скорости резания на всех шлифуемых деталях во всех точках и создание необходимых давлений и возможность регулирования величины давления.



Фиг. 91. Схема шлифовки на шайбе с равными скоростями резания.

С этой целью поводковый диск применяется с диаметром меньше половины диаметра шлифующей шайбы. Центр поводкового диска закрепляется неподвижно (без колебательных движений) и диску сообщается вращательное движение в ту же сторону, что и у шлиф-шайбы, и с тем же числом оборотов в минуту.

При этом на периферии скорости движения точек на диске и шлиф-шайбе вычитаются, а ближе к центру суммируются; таким образом, относительная скорость движения любой точки шлиф-шайбы по отношению к соответствующей точке на поводковом диске будет одинакова (т. е. будет постоянная скорость резания).

Это видно из фиг. 91 и приведенного примера

$$V_{рез.A} = V_{макс} - V_1 = \pi Dn - \pi dn = \pi n (D - d),$$

$$V_{рез.B} = V_{cp} + V_1 = \pi (D - 2d) + \pi dn = \pi n (D - d),$$

$$V_{рез.O} = \pi n (D - d),$$

отсюда

$$V_{рез.A} = V_{рез.B} = V_{рез.O}.$$

Для осуществления давления 150—250 *г/см*² при резании на станке должно обеспечиваться прижимание диска с деталями к шлиф-шайбе с помощью соответствующего груза, пружины, гидравлического или пневматического поршня,

Применение описанной измененной методики шлифовки обеспечивает ускорение процесса шлифовки керамических деталей в 10—15 раз при резком улучшении качества шлифовки, устраняет трудоемкие операции приклейки мелких деталей к поводковому диску на канифоли и связанные с этим операции промывки в органических жидкостях и горячей воде, так как при применении диска малых размеров отпадает необходимость приклейки деталей (крепление обеспечивается резиновой прокладкой).

В дополнение следует отметить отличительную особенность обработки обожженных изделий, изготовленных горячим литьем, которая заключается в повышенной точности размеров литых изделий, снижении до минимума припусков на шлифовку, что сильно облегчает процесс обработки и повышает производительность труда.

ГЛАВА ШЕСТАЯ
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕГО ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ РАЗВИТИЯ

Существующая обычная технологическая схема изготовления керамических изделий страдает рядом специфических недостатков:

1) большой продолжительностью технологического цикла;

2) низкой механической прочностью полуфабриката;

3) большим производственным браком в результате деформации и трещин в сушке и обжиге;

4) невысокой точностью изделий;

5) недостаточной стабильностью свойств изделий.

Горячее литье под давлением керамических изделий обеспечивает существенное улучшение основных технико-экономических показателей.

Технологический цикл резко сокращается. В ряде случаев, например при изготовлении каркасов катушек индуктивности, цикл сокращается в несколько раз за счет замены ряда операций (протяжка, сушка, парафинирование, механическая обработка и т. д.) одной операцией — отливкой.

Механическая прочность полуфабриката повышается в 3—4 раза, что уменьшает брак по сколам и поломке при транспортировке и хранении полуфабриката.

Брак из-за трещин и деформации снижается до минимума вследствие создания рациональной структуры полуфабриката.

Устраняются случайность и стихийность в работе, неизбежные при работе по обычной керамической технологии, зависящей: от состава воды, меняющегося в различное время года, температуры в цехе, циркуляции воздуха в помещении (сквозняки), времени хранения полуфабриката между операциями, неизбежных колебаний в составе исходного сырья (глин, шпата и т. д.) и целого ряда других причин.

Трещины, деформации и другие дефекты, связанные с усадкой при сушке полуфабриката, изготовленного по обычной технологии, отпадают, так как по новой технологии в полуфабрикате при удалении связки практически не имеется усадок.

Точные цифровые данные экономического эффекта от применения способа горячего литья, несмотря на его весьма значительную и явную экономичность и эффективность, привести крайне затруднительно. Наибольшее применение способ получил для изготовления высококачественных, точных и сложных керамических изделий, которые по существующей обычной керамической технологии либо изготовить вообще нельзя, либо трудоемкость и стоимость изготовления изделий и брак в производстве исключительно велики.

Ниже приводится перечень основных показателей, характеризующих эффективность способа литья под давлением.

1) Производительность труда при оформлении изделий литьем под давлением на простых аппаратах в 2—3 раза выше по сравнению с одним из наиболее совершенных методов существующей технологии прессованием. При работе на автоматах для литья под давлением производительность труда еще выше, так как наряду с высокой производительностью автомата один рабочий может обслужить несколько автоматов. Производительность на простых аппаратах составляет 1 000—4 000 шт. в смену, а на автомате достигает 50 000 шт. в смену.

2) Способ обеспечивает получение керамических изделий с высокой точностью размеров (IV—V класс точности), что в большинстве случаев исключает необходимость в трудоемкой операции шлифовки изделий после обжига и, следовательно, снижает трудоемкость, уменьшает расход энергии и не требует установки и использования большого количества шлифовальных станков.

3) Способ обеспечивает получение изделий законченной формы независимо от сложности конфигурации, что дает большую экономию труда и уменьшает накладные расходы,

так как отпадает необходимость в механической обработке для придания формы изделию.

4) Формы (оснастка) для осуществления способа литья под давлением значительно проще по конструкции и в 4—5 раз дешевле в изготовлении, чем прессформы для прессования. Наряду с этим износоустойчивость форм для горячего литья под давлением в 10—15 раз выше, чем прессформ для прессования. Это обусловливает большую экономию на расходах по изготовлению, ремонту и эксплуатации форм.

5) Расход материала, идущего на изготовление изделия, минимальный, так как при применении литья под давлением практически нет отходов вследтсвие того, что не требуется никаких припусков для последующей обработки. Незначительные обрезки материала, получающиеся при удалении литника, здесь же полностью используются для отливки других деталей без всякой дополнительной переработки.

6) Для изготовления даже самых сложных деталей не требуется высококвалифицированной рабочей силы, что снижает себестоимость продукции.

7) Простота конструкции, дешевизна и малогабаритность применяемого оборудования в сочетании с его высокой производительностью, обеспечивает потребность в малых производственных помещениях и незначительные расходы на эксплуатацию оборудования по сравнению с оборудованием, применяемым в обычной технологии (гидравлические прессы и т. п.).

8) Новая технология не только обеспечивает возможность изготовления сложных изделий из высококачественных непластичных материалов, но наряду с этим приводит к ряду дополнительных положительных моментов.

Так, например, полуфабрикат и исходный шликер могут неограниченно продолжительное время храниться, не изменяя своих свойств (никакой усушки, как в обычной технологии, не имеется).

Эта особенность шликера и полуфабриката открывает совершенно новые перспективы развития керамической промышленности. Здесь создается возможность раздельной подготовки различного сортамента исходных материалов в полуфабрикате на отдельных специализированных заводах с последующей их транспортировкой и использованием для изготовления керамических изделий различных свойств и форм.

Несомненно, что такая специализация заводов керамической промышленности создает возможность быстрого прогресса и широкого внедрения в технику дешевых керамических изделий из непластичного минерального сырья взамен дорогостоящих пластмасс, а в ряде случаев даже взамен металлоизделий.

9) Эффект от применения разработанного способа заключается также в том, что он обеспечивает возможность выпуска таких керамических изделий, которые не могут быть изготовлены по существующей технологии. К такого рода керамическим изделиям относятся в первую очередь изделия, применяющиеся в новейшей радиотехнической аппаратуре, в специальных приборах и т. п.

В заключение необходимо отметить, что технология горячего литья под давлением имеет большие перспективы дальнейшего развития.

Описанная технология является результатом нескольких лет работы и несомненно может быть серьезно усовершенствована.

Уже имеются решения по упрощению технологии, например способ изготовления литых керамических изделий с однократным обжигом [Л. 19], т. е. без предварительного удаления связки в засыпке, и т. д.

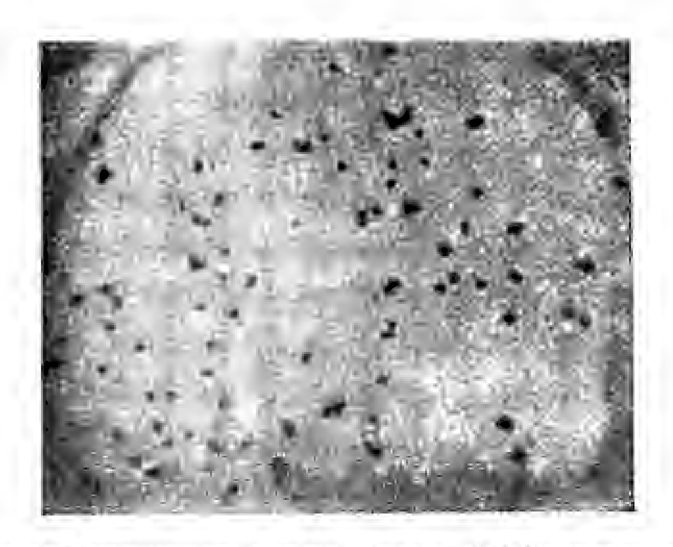
В дальнейшем открываются возможности существенного повышения свойств керамических материалов для горячего литья, упрощения технологии приготовления керамических материалов и литейных шликеров, дальнейшего снижения количества связки, необходимого для приготовления литейных шликеров, и уменьшения в связи с этим огневых усадок, и т. д.

Весьма велики перспективы, открываемые технологией горячего литья в смысле расширения области применения керамических изделий, в связи с повышением их свойств и точности размеров наряду со снижением стоимости изготовления. Реальная возможность полной механизации и автоматизации процесса производства при использовании технологии горячего литья под давлением сулит еще более существенное снижение себестоимости и повышение качества керамических изделий самого различного назначения.

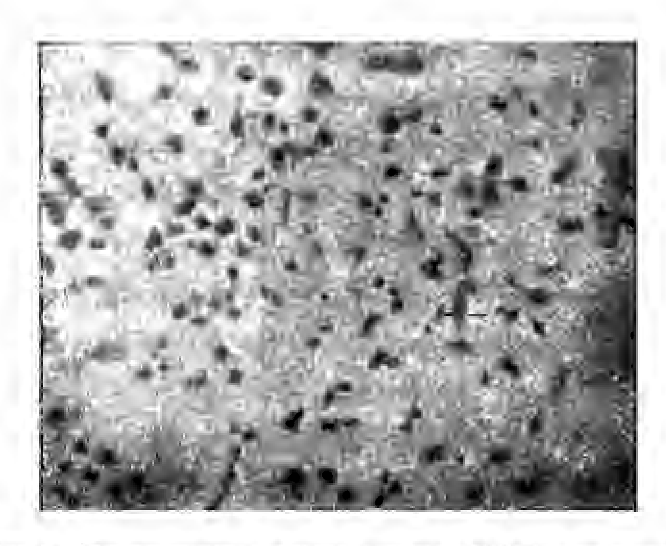
ЛИТЕРАТУРА

1. П. О. Грибовский, Исследование процесса намораживания, диссертация, 1948.
2. П. О. Грибовский, Горячее литье под давлением керамических изделий. Авторское свидетельство № 91236, 1948.
3. А. В. Ярошевский, Рационализация технологии производства глиняного кирпича. БТИ, МПСМ РСФСР, 1946.
4. П. П. Будников, Технология керамики и огнеупоров, Промстройиздат, 1950.
5. М. О. Юшкевич, Технология керамики, Промстройиздат, 1951.
6. Г. Н. Дудеров, М. А. Матвеев и Г. Г. Сентюрин, Общий курс технологии силикатов, Промстройиздат, 1942.
7. В. П. Перевалов, Технология огнеупоров, Металлургиздат, 1944.
8. П. О. Грибовский, К вопросу о структурообразовании керамического полуфабриката. Сборник научных трудов по стеклу, Промстройиздат, 1950.
9. Уайт и Вэлтон, Форма и упаковка частиц, Журнал Американского керамического общества № 5, 1937.
10. Л. А. Шмелев, Укладка зерен различных фракций и влияние гранулометрического состава на свойства черепка, ВНИИК, вып. 45, Гизлегпром, 1934.
11. Д. Н. Полубояринов, Влияние гранулометрического состава шамота на качество готовой продукции, Труды ВИОК, вып. II, 1934.
12. Г. Барр, Вискозиметрия, ГОНТИ НКТП СССР, 1944.
13. М. М. Кусаков, Методы определения физико-химических характеристик нефтепродуктов, ОНТИ, 1936.
14. М. П. Воларович, Исследование реологических свойств дисперсных систем, Коллоидный журнал № 3, т. XVI, АН СССР, 1954.
15. В. А. Перов, В. Ю. Брандт, Измельчение руд, Металлургиздат, 1950.
16. П. О. Грибовский, И. И. Китайгородский, Непрерывное литье керамических изделий. Авторское свидетельство № 91404, 1949.
17. П. О. Грибовский, Автомат для литья под давлением. Авторское свидетельство № 92042, 1950.
18. П. О. Грибовский, В. И. Гольдштейн, Б. Н. Можаев и Е. Г. Смажевская, Устройство для горячего литья керамических изделий. Авторское свидетельство № 96323, 1952.
19. П. О. Грибовский, В. И. Гольдштейн, Б. Н. Можаев и Е. Г. Смажевская, Способ изготовления керамических изделий. Авторское свидетельство № 96326, 1952.

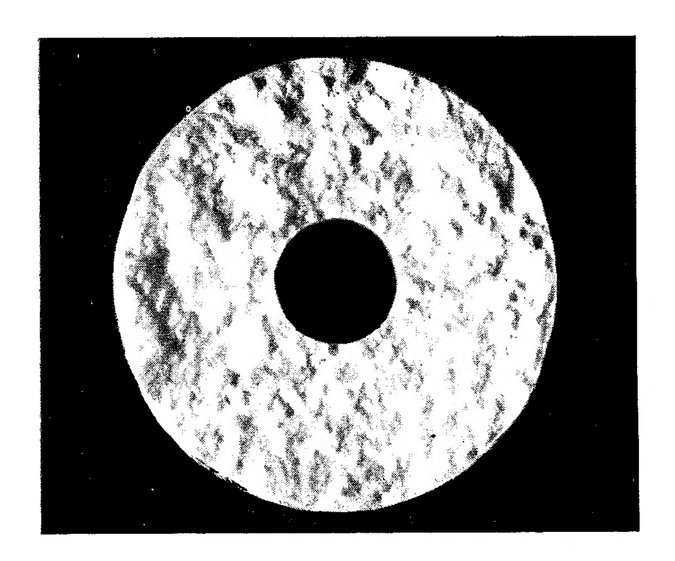
ОГЛАВЛЕНИЕ



Фиг. 2. Микроструктура образца (увелич. ×240) муллитового материала при коэффициенте упаковки полуфабриката $K = 0{,}57$.

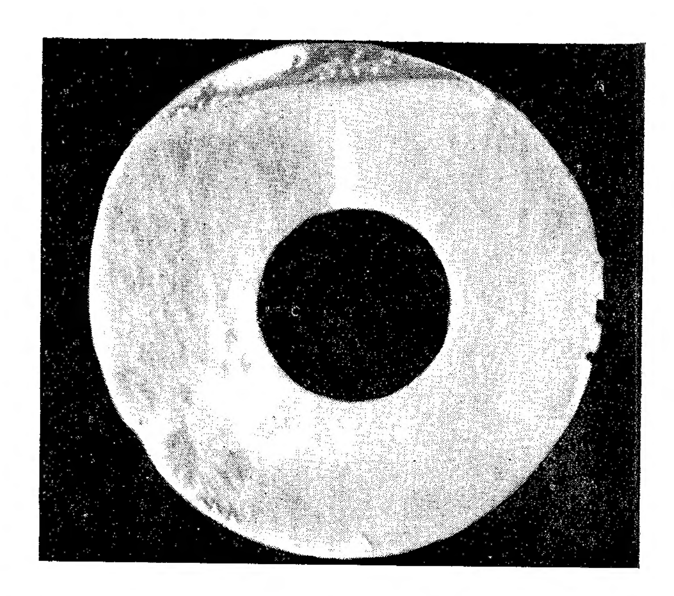


Фиг. 3. Микроструктура образца (увелич. ×240) муллитового материала при коэффициенте упаковки полуфабриката $K = 0{,}35$.



Фиг. 4. Макроструктура полуфабриката при действии внешних сил перпендикулярно плоскости снимка (прессование). Структура грубозернистая, рыхлая.

Фиг. 5. Макроструктура полуфабриката при действии внешних сил радиально (протягивание). Структура неоднородная, рыхлая в центре и уплотнененная на периферии.



Фиг. 6. Макроструктура полуфабриката при действии гравитационных сил (намораживание). Структура плотная, однородная.

Фиг. 7. Макроструктура полуфабриката при действии гравитационных сил (литье в кокиль). Структура плотная, однородная.

Фиг. 8. Макроструктура полуфабриката при действии центробежны
сил (центробежное литье). Структура плотная, неоднородная.
В центре видна отделившаяся связка.



Фиг. 34. Фотография микроструктуры парафина (увелич. 930).

Цена 6 р. 25 к.